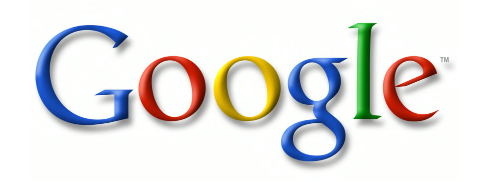
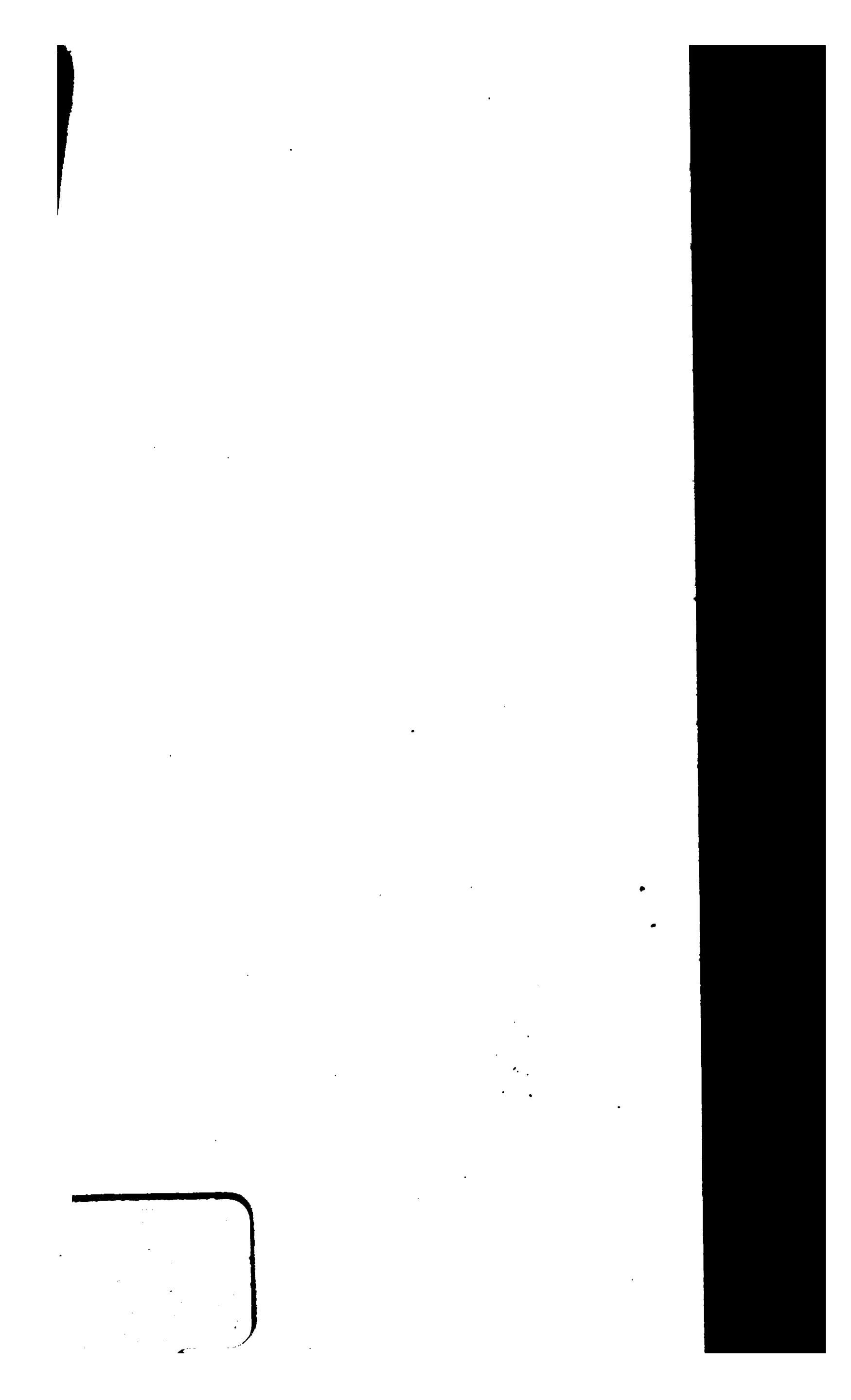
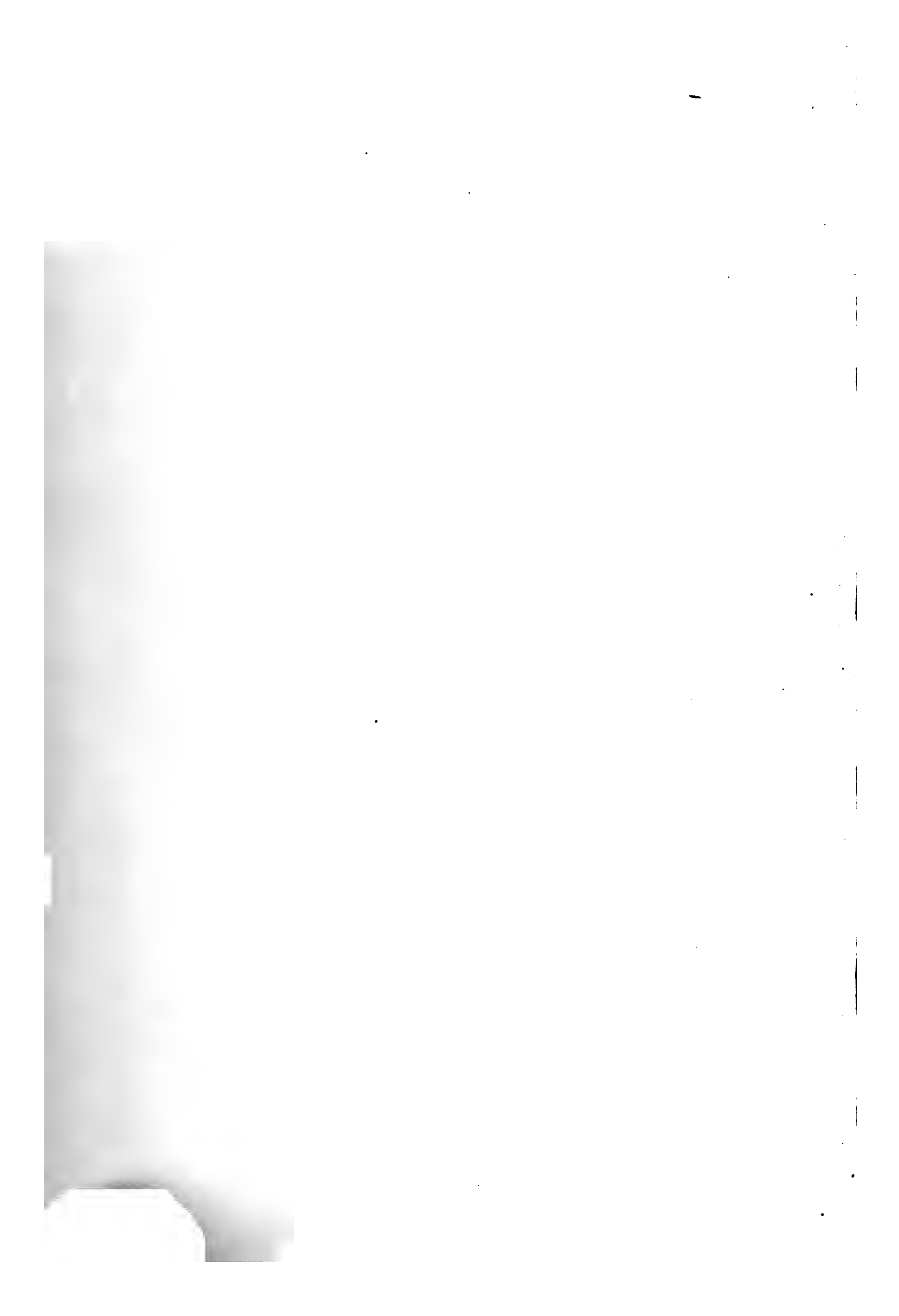
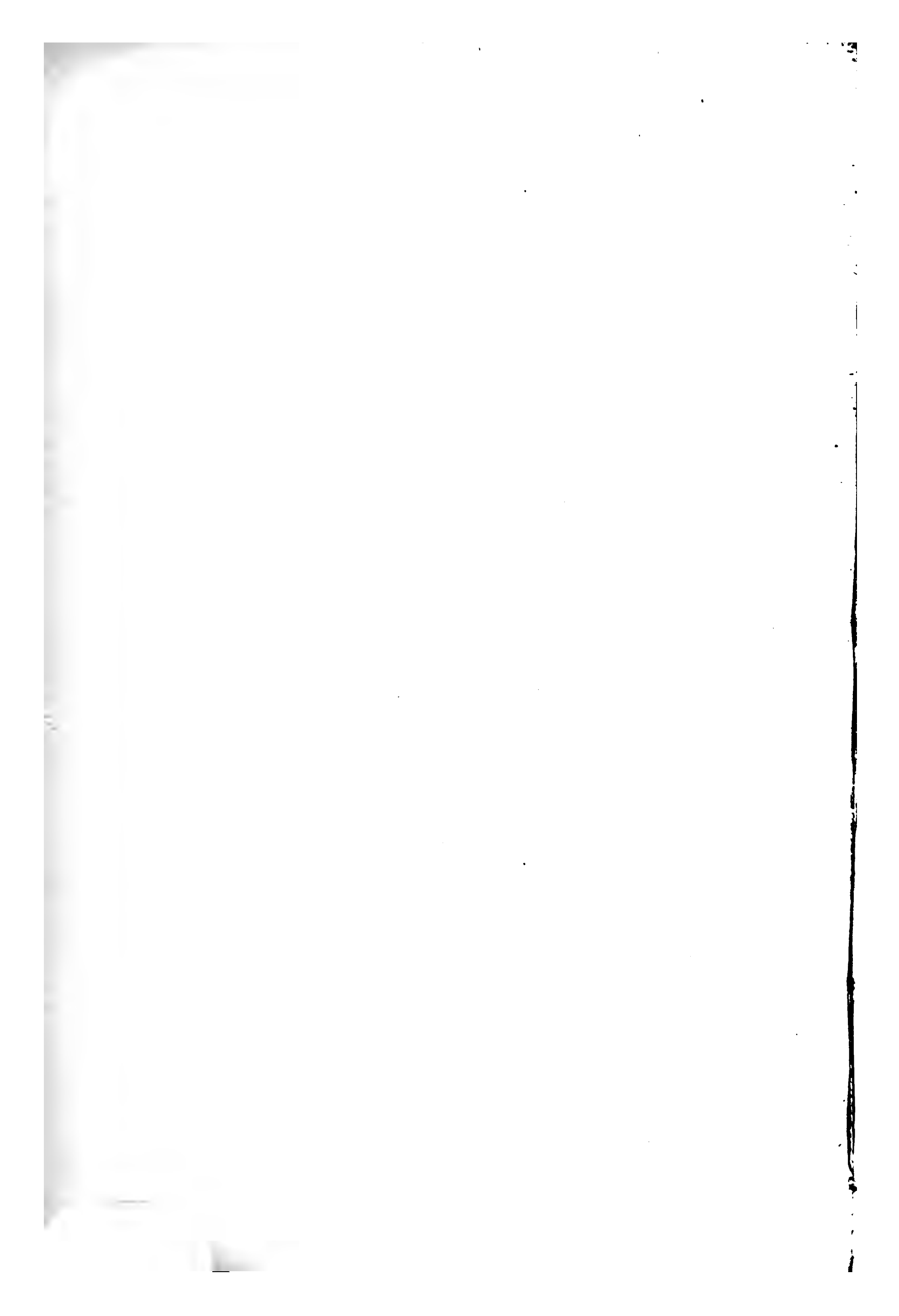








L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE



BIBLIOTHÈQUE ÉLECTROTECHNIQUE N° 8

L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

TRAITÉ PRATIQUE DE MONTAGE & DE CONDUITE DES INSTALLATIONS D'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

PAR

François MIRON

Licencié ès-Sciences Physiques, Ingénieur Civil

TOME PREMIER

Générateurs d'énergie mécanique
Générateurs d'énergie électrique — Modes de distribution
Canalisations — Photométrie

230 FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS
LIBRAIRIE INDUSTRIELLE
J. FRITSCH, ÉDITEUR
30, RUE DU DRAGON, 30

1896

PRÉFACE

*Un traité de l'*Eclairage par l'Electricité *n'est pas chose nouvelle, car il est peu de questions qui aient tenté plus d'auteurs, si l'on en excepte même les Traités d'Electricité où cette branche occupe, comme il est naturel, une place importante.*

Mais, en laissant de côté toute question d'amour propre d'auteur, il faut reconnaître que peu d'ouvrages sont faits au point de vue pratique et que dans la plupart on cherche vainement l'étude des éléments constitutifs d'une installation, la nomenclature, la description et la mode d'emploi des articles d'appareillage indispensables à tout montage et enfin, à côté de descriptions d'installations en service, les règlements administratifs qui régissent les installations intérieures, la pose des canalisations sur la voie publique et des renseignements sur le prix de revient du kilowatt-heure.

Le but de cet ouvrage n'est pas d'ajouter une unité au nombre des Traités d'Éclairage Électrique déjà parus, mais de fournir à l'ingénieur d'une part, les éléments d'étude d'une installation privée ou urbaine, et au monteur d'autre part, la connaissance des divers types d'articles d'appareillage et de leur emploi.

Etabli selon ce programme, cet ouvrage sera sobre en matière de théorie, bien que l'on y trouve toutes les formules qu'il peut être utile de connaître, plus sobre encore sur la description des générateurs d'énergie électrique; par contre l'étude des accidents *et de leurs* remèdes *occupe une place importante, et des développements en rapport avec leur utilité pratique ont été donnés à la photométrie et à l'étude de la variation d'effet utile des différents foyers électriques suivant les conditions de leur emploi.*

Le tome Ier étant plus spécialement consacré à l'exposé des bases d'une installation, nous l'avons fait suivre du chapitre photométrie *dont la place semblerait être après les* foyers lumineux. *Sous le bénéfice de cette observation, nous croyons avoir adopté et suivi un ordre logique d'exposition en étudiant successivement les éléments d'une installation au fur et à mesure qu'ils se présentent en partant du générateur d'énergie électrique pour aboutir aux lampes.*

Mars, 1896.

L'AUTEUR.

L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION DE LA FORCE MOTRICE

La production de l'énergie électrique est intimement liée à celle de la force motrice ; aussi croyons-nous devoir rappeler les principales catégories de moteurs appliqués dans les installations électriques ; mais toutefois, sans aborder leur théorie ni donner des descriptions de machines quand celles-ci sont très connues du public, comme c'est le cas pour les machines à vapeur ordinaires.

Le point le plus intéressant à considérer est le prix de revient du cheval-heure ou plutôt du kilowatt-heure. Les conditions d'établissement de ce prix de revient étant toujours discutables, nous préférerons indiquer seulement dans les chapitres consacrés aux descriptions de stations électriques, que la production de *tant* de kilowats-heure a entraîné une dépense de *tant* pour force motrice.

Nous examinerons successivement :

Les Foyers fumivores.

Les Générateurs de vapeur.

Les Moteurs à vapeur.
Les Turbo-moteurs.
Les Moteurs à gaz.
Les Moteurs à pétrole.
Les Turbines hydrauliques.

Foyers.

La combustion du charbon sous les générateurs de vapeur s'opère presque toujours incomplètement ; en outre les gaz chauds entraînent avec eux des particules de carbone non brûlé qui forment la fumée.

Les foyers fumivores ont pour objet de brûler aussi complètement que possible tout le carbone, et de ne rejeter que de l'acide carbonique dans l'atmosphère.

Foyer Meldrum. — Ce foyer à tirage forcé peut, par la disposition de ses grilles, brûler des fines et même des plus fins : l'écartement des barreaux est de 1 à 2 millimètres.

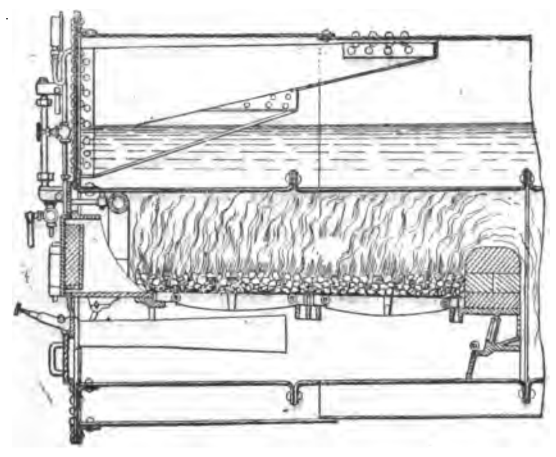


Fig. 1. — Coupe du foyer Meldrum.

A l'avant, le cendrier est fermé par deux plaques dans lesquelles sont fixés deux souffleurs qui débouchent sous la grille. De petits tubes envoient dans les souffleurs de la vapeur empruntée à la chaudière, et il résulte, en outre d'un appel d'air, un refroidissement des barreaux et un mode logique de combustion du charbon.

La consommation de vapeur par les souffleurs est de 2 à 4 °/₀ de la production totale de la chaudière.

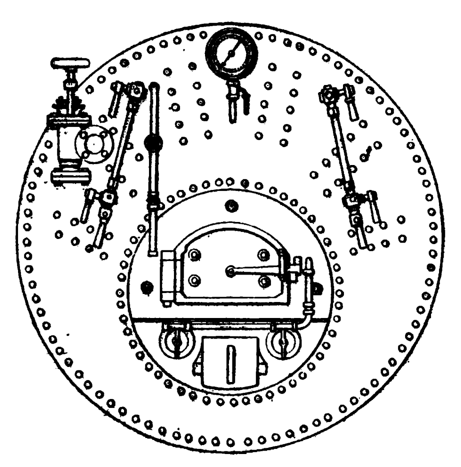


Fig. 2. — Foyer Meldrum. Vue de la partie antérieure.

Le foyer Meldrum, construit à Manchester, est assez répandu en Angleterre en raison de sa fumivorité et de l'économie qu'il procure.

Foyer Hermann Cohen. — Nous résumons la description de ce foyer, de construction française, et les expériences auxquelles il a donné lieu, d'après une communication de M. Leroux à la Société des Ingénieurs Civils.

Le foyer système Cohen comporte trois grilles distinctes surmontées d'une trémie en tôle et cornières.

La grille principale, inclinée à environ 45° sur l'horizontale, est formée de barreaux en fonte indépendants, reposant à leur partie inférieure sur un sommier en fer et à leur partie supérieure sur un arbre porté par deux bras en fonte.

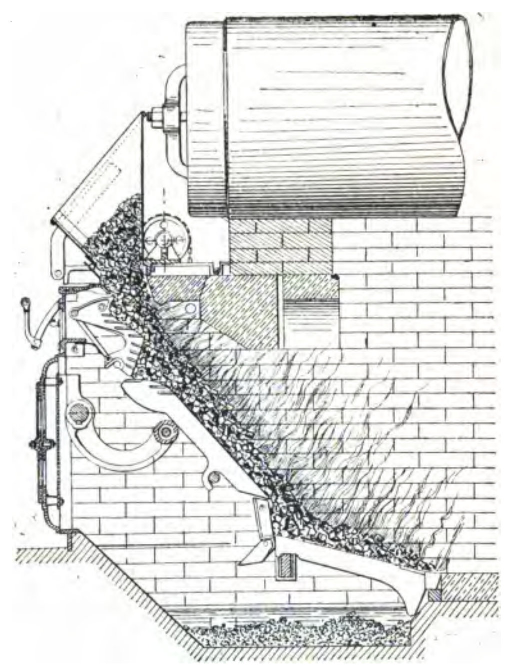


Fig. 3. — Foyer Cohen. Coupe.

Ces barreaux ont une grande hauteur, afin de faciliter leur refroidissement par l'air traversant la grille. Ils portent une série de nervures, les unes à la partie inférieure, symétriques par rapport à l'axe du barreau pour maintenir leur écartement ; les autres, à la partie supérieure, au nombre de trois ou quatre, placées sur une seule face

du barreau et qui ont un double but : maintenir l'écartement et empêcher les fines non encore agglutinées de tomber dans le cendrier. Un des barreaux extérieurs présente seul des nervures sur les deux faces.

La partie postérieure du barreau porte également sur une certaine longueur une nervure moins large, le long de laquelle se déplace le sommier mobile supportant la grille à sa partie supérieure, lorsque l'on veut abaisser celle-ci pour l'allumage du foyer.

La grille de pied reçoit les cendres et les mâchefers, elle repose à l'arrière sur un sommier en fonte prolongé par des briques réfractaires formant l'autel du foyer et à l'avant sur une traverse en fonte encastrée dans les maçonneries latérales.

Elle est soutenue en son milieu par une console, sur laquelle repose la partie médiane du sommier inférieur de la grande grille.

Grâce à cette disposition, ce sommier peut être fait en deux pièces.

Les barreaux de la grille de pied sont jointifs sur une partie de leur longueur pour restreindre autant que possible le passage de l'air en cet endroit.

Un des derniers perfectionnements apportés a été le remplacement de la traverse en fonte supportant l'avant des barreaux de la grille de pied par une traverse en fer. La température existant en ce point permet cette substitution, et l'on n'a plus à redouter les ruptures de cette traverse lorsque par un arrosage l'on vient à éteindre les mâchefers dans le cendrier.

La grille supérieure est formée de barreaux dont la forme varie avec la nature du combustible.

Ces barreaux sont fixés sur un cadre auquel on peut

donner un mouvement de rotation au moyen d'un levier placé extérieurement sur un des côtés du foyer.

Ils portent une série de nervures sur une seule face, sauf les barreaux extrêmes qui sont à double nervure. Ces nervures servent tant à maintenir l'écartement qu'à empêcher les fines de tomber dans le cendrier.

A la même hauteur que la grille supérieure se trouve une voûte en briques réfractaires et sur les côtés sont ménagés des orifices d'arrivée d'air.

L'air peut pénétrer par les orifices à travers les barreaux de la grille supérieure et sous la grille par un papillon placé sur les portes du foyer. Ces deux arrivées d'air sont séparées par un diaphragme qui rend leur réglage indépendant.

L'appareil est renfermé dans une boîte rectangulaire formée de deux côtés en fonte, garnis intérieurement de briques réfractaires, reliés à l'avant et à leur partie supérieure par des traverses en fonte. A la partie antérieure se trouve une ou deux portes, suivant la largeur du foyer.

La voûte réfractaire repose sur les deux côté du foyer.

Le chargement du combustible se fait dans la trémie qui porte sur sa face antérieure deux fers plats entre lesquels on peut introduire un sabre pour assurer la descente régulière du combustible sur toute la largeur du foyer et éviter toute obstruction à la partie basse de la trémie.

En raison de la hauteur de l'appareil et afin de ne pas gêner le nettoyage des bouilleurs ou des tubes de la chaudière, la trémie peut se rabattre complètement sur l'avant du foyer en tournant autour de l'axe.

Le combustible glisse d'une part entre une plaquette

en fonte ou en fer à l'arrière dont l'extrémité inférieure a pour but de régler l'épaisseur de la couche de combustible sur la grille, d'autre part entre les fers plats cités plus haut sur la face antérieure.

Le combustible tombe sur la grille supérieure où il est soumis à la chaleur due au rayonnement de la voûte, ce qui a pour effet de produire sa distillation. Les gaz

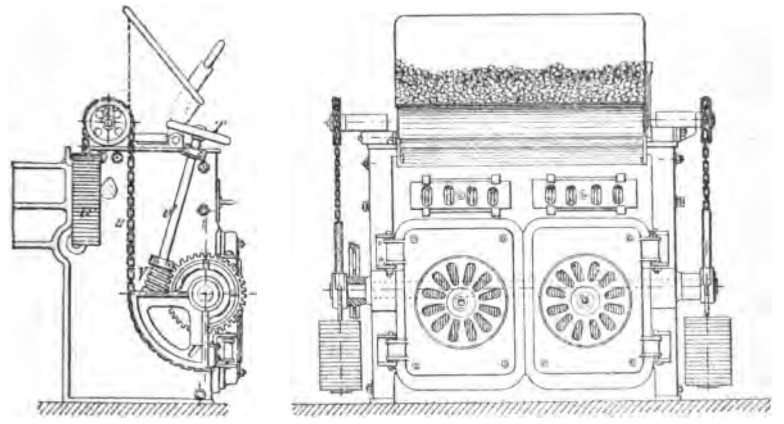


Fig. 4 et 5. — Trémie et appareil de chargement.

combustibles dégagés sont mélangés à de l'air passant à travers la grille et arrivant également par les orifices latéraux au-dessus de la couche de combustible. Le comburant entrant ainsi suivant deux directions perpendiculaires produit un brassage énergique des gaz et un mélange intime des matières volatiles provenant de la distillation du combustible avec l'air destiné à les brûler.

Ce mélange, par suite du tirage de la cheminée, passe entre la voûte, maintenue à une température très élevée, et la masse incandescente placée sur la grande grille. La combustion de ces produits gazeux se trouve donc assurée.

Le mouvement de rotation donné à la grille a pour effet, grâce à la forme spéciale des barreaux, de rejeter le combustible distillé et déjà enflammé à la surface de celui qui brûle sur la grande grille.

En outre, lors de la remise de la grille mobile dans sa position normale, le combustible nouveau vient prendre la place de celui qui a été déplacé.

Cette grille permet donc de régler la puissance de vaporisation du foyer comme lors d'un chargement à la pelle, mais elle présente en outre l'avantage de ne charger sur la grande grille que du combustible ayant précédemment subi une distillation et déjà en ignition, au lieu d'y jeter du combustible absolument frais.

La combustion se fait ensuite comme sur une grille ordinaire, mais il ne tombe que du coke et les fines du combustible employé y arrivent dejà agglutinées.

Les cendres et les mâchefers ne se produisent qu'au bas de la grille et sur la grille de pied, d'où il est facile de les enlever, ainsi que nous le verrons plus loin.

Les portes du cendrier doivent rester fermées en temps normal ; leur papillon seul est ouvert ainsi que le registre, mais ces ouvertures peuvent être réglées suivant le tirage de la cheminée, la nature du combustible et la quantité de vapeur à produire.

Le point caractéristique du foyer en question est le fractionnement de la combustion en deux phases :

1° Distillation du combustible et combustion des éléments gazeux ;

2° Combustion du combustible distillé.

On obtient le premier résultat par le rayonnement d'une voûte en briques réfractaires s'appuyant sur les deux côtés du foyer. Sa poussée est contre-balancée par

une traverse en fonte à l'avant et un tirant en fer à l'arrière.

Enfin, nous pouvons encore signaler comme des dispositifs spéciaux au foyer Cohen :

1° La mobilité de la grille ;

2° Le réglage, au gré du chauffeur, de la puissance de vaporisation de l'appareil, qui en est la conséquence ;

3° Les arrivées d'air distinctes pour chacune des deux phases de la combustion, et leur réglage se faisant séparément.

Jusqu'ici, dans les applications du foyer Cohen, la longueur de la grille est constante, la largeur seule est variable.

Cette longueur peut se décomposer ainsi :

Grille supérieure (B).	0m,250
Grande grille (C)	1 ,000
Grille de pied (D).	0 ,250
TOTAL.	1m,500

Pour une largeur de 1 m, la surface de grille est, en conséquence, de 1 m $\times$ 1,50 m = 1,50 m².

Dans le modèle réduit signalé précédemment, la longueur de la grille est la suivante :

Grille supérieure (B)	0m,250
Grande grille (C)	0 ,700
Grille de pied (D).	0 ,250
TOTAL.	1m,200

Pour une largeur de 1 m la surface de grille n'est plus que de 1,20 m $\times$ 1 m = 1,20 m².

Un point très important a été établi d'après la marche du premier foyer, qui a été monté dans la station centrale d'électricité du Palais-Royal : la quantité de combustible brûlé par heure est extrêmement variable et le chauffeur peut régler à son gré cette consommation.

Le générateur de cette station, muni du foyer Cohen, marche 24 heures et il est seul en feu de minuit à 5 heures du soir. On lui adjoint un autre générateur de 5 heures à minuit, et un deuxième de 7 heures à minuit ; ces deux derniers étaient pourvus seulement de la grille ordinaire, à l'époque de ces essais.

Ceux-ci ont été faits pendant six jours consécutifs avec du charbon demi-gras formé en grande partie de fines, et les résultats en ont été communiqués à MM. Hermann et Cohen par M. A. Vernes, l'Ingénieur en chef bien connu de la Compagnie Electro-mécanique.

La largeur du foyer est de 1,40 m et sa surface de

$$1,50 \text{ m} \times 1,40 \text{ m} = 2,10 \text{ m}^2.$$

Les moyennes des consommations de combustible pendant cette période ont été :

		Consommation totale de combustible	Consommation par heure	Consommation par heure et par mètre carré de grille
		kg.	kg.	kg.
De minuit à midi. . . .	12 heures.	1 280	107	51,
De midi à 5 heures (soir) .	5 —	700	140	66,7
De 5 heures (soir) à minuit.	7 —	1 160	166	79,
Total. . . .	24 heures.	3 140	Moy. 13	Moy. 62,5

Pendant cette même période, la dépense moyenne de combustible par jour fut de 5 400 kgs, en y comprenant ce qui a été brûlé tant dans le foyer Cohen que sur les grilles ordinaires.

Avant la mise en service du foyer Cohen, avec le même charbon et les mêmes chauffeurs, la dépense

moyenne de combustible avait été pendant les jours correspondants de la semaine précédente de 6 140 kgs.

D'où une économie de 740 kgs de charbon par 24 heures.

Ces chiffres n'ont rien d'absolu, puisqu'il est possible que le service ait été différent pendant les deux périodes considérées ; seuls les Ingénieurs de la Société Edison ont pu pendant des temps beaucoup plus longs comparer les résultats de leur exploitation avant et après l'installation du foyer Cohen.

Quelques analyses sommaires des gaz de la combustion ont été faites sur un foyer Cohen dans une autre usine. Elles ont seulement prouvé que la combustion avait plutôt tendance à se faire avec un grand excès de comburant et qu'il y avait lieu, pour éviter cet excès de comburant, de régler soigneusement le papillon d'arrivée de l'air sous la grille (C) et sous la grille de pied (D).

Citons encore quelques essais faits chez MM. Sordes, Huillard et Cie pour la combustion des bois humides.

La chaudière à bouilleurs avait environ 50 m² de surface de chauffe et le foyer en service une largeur de 1,60 m. La vapeur était prise à une pression de 5 kilgs.

Dans le premier essai qui remonte au 3 septembre 1889, le combustible employé était formé de copeaux de bois de campêche à 55 % d'eau sans aucune addition de charbon :

La durée de l'essai fut de	9	heures
Le poids total de combustible brûlé. . .	5 586	kilogrammes
Le poids de combustible brûlé par heure.	620	—
Poids de l'eau introduite dans la chaudière	8 596	—
Eau vaporisée par kilogramme de combustible	1kg,53	

Dans un essai de même durée fait le 4 septembre 1889 sur le même générateur, on brûla des copeaux de châ-

taignier à 64 % d'eau additionnés de 5,19 pour cent de charbon.

Poids total en kilogr du combustible humide brûlé. . .	6 326
— — du charbon brûlé	328
Poids total.	6 648
Poids par heure en kilogr de combustible humide brûlé.	702
Poids par heure en kilogr de charbon brûlé	36,5
Poids par heure.	738,5
Poids en kilogr d'eau introduite dans la chaudière. . .	8 000
Poids de vapeur produite par kilogramme de combustible mixte.	1,20

Si on admet que l'on produisait 7 kgs de vapeur par kilogramme de charbon brûlé, l'eau vaporisée par le combustible humide n'est plus que :

$$8\,000 \text{ kg} - 2\,296 \text{ kg} = 5\,704 \text{ kg},$$

soit 0,903 kg de vapeur produite par kilogramme de bois brûlé.

Générateurs de Vapeur.

Les générateurs se divisent en deux catégories : les générateurs à *bouilleurs* et ceux à *tubes* ; la pression maxima de la vapeur ne dépasse généralement pas 8 atmosphères dans les premiers, et elle peut aller à 30 atmosphères dans les seconds.

Les générateurs sont desservis par un *injecteur* et une *pompe d'alimentation*, mue directement par le moteur ou par un moteur spécial faisant corps avec elle et alimenté par la vapeur de la chaudière. L'eau d'alimentation peut être préalablement *réchauffée* à l'aide de *réchauffeurs*, appareils formés d'une série de tubes

dans lesquels cette eau circule, et que chauffe la vapeur d'échappement.

En outre, depuis quelques années on tente de faire rendre à la vapeur son maximum de puissance, en la *surchauffant* par les gaz chauds du foyer avant de l'admettre dans le moteur.

Générateurs à basse pression. — La chaudière à bouilleurs est le type classique des générateurs à basse pression.

Elle comprend deux parties principales :

Un *corps* formé d'un cylindre horizontal de large diamètre, un ou deux *bouilleurs*, cylindres de faible diamètre, et parallèles au corps, réunis à ce dernier chacun par une tubulure.

A la partie supérieure du corps sont répartis : la prise de vapeur, les soupapes de sûreté, l'appareil d'alimentation d'eau, le trou d'homme, les appareils de mesures.

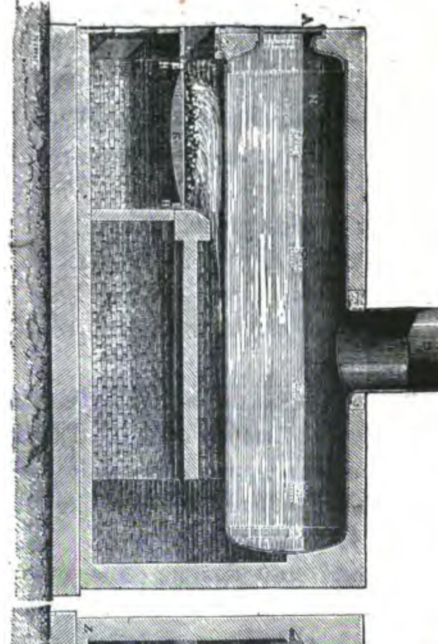
La prise de vapeur est l'orifice sur lequel est fixée la conduite qui amènera la vapeur au moteur.

Les soupapes de sûreté sont des tampons pressés par un ressort ou un contrepoids, sur des ouvertures pratiquées dans le corps de la chaudière. Si la pression intérieure vient à dépasser sa valeur normale, les soupapes sont soulevées et la vapeur s'échappe.

L'appareil d'alimentation peut être une pompe actionnée par la machine à vapeur, ou un injecteur, sorte de trompe qui aspire l'eau, etc. Il peut fonctionner sans interruption, ou seulement suivant les besoins.

Le trou d'homme est une large ouverture pratiquée dans le corps, obturée hermétiquement en temps normal, et par laquelle un homme peut s'introduire pour nettoyer l'intérieur de la chaudière.

Les bouilleurs, les tubulures et la partie inférieure des corps sont exposés, les premiers à l'action directe des flammes du foyer, et les seconds à celle des gaz chauds qui circulent dans la partie comprise entre le foyer et la cheminée.



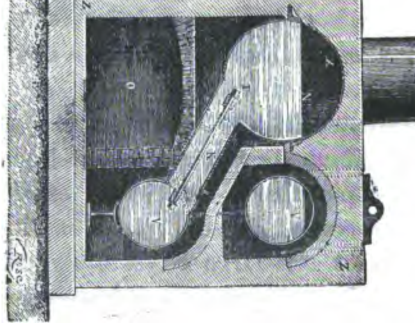


Fig 6. — Chaudière à bouilleurs.

Les gaz chauds font le tour complet du corps en suivant des carneaux: ces chaudières doivent donc être montées sur des foyers à retour de flamme.

Une chaudière à deux bouileurs latéraux de 75 mètres carrés de surface de chauffe produit environ 500 kgs. de va-

peur à 7 atmosphères par heure : elle nécessite environ 50 mètres cubes de maçonnerie.

Chaudières à foyer intérieur. — Dans ce type, le corps est formé de deux cylindres, de diamètre différent de même longueur mais non concentriques.

L'eau est renfermée dans l'espace annulaire compris entre les deux surfaces cylindriques, et le foyer est placé à l'intérieur de la plus petite.

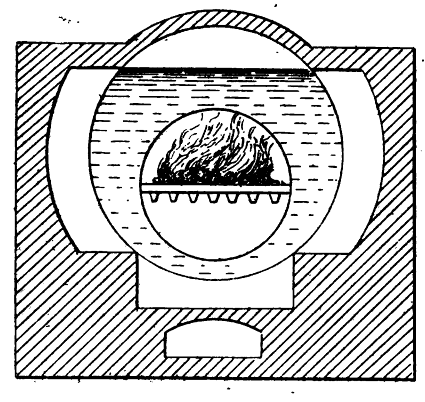


Fig. 7. — Chaudière à foyer intérieur.

La couche supérieure de l'eau est soumise seule à l'action directe des flammes du foyer, et les gaz chauds après avoir fait le tour complet du corps, descendent, suivant sa paroi inférieure, et se dirigent ensuite à la cheminée. Cette disposition est assez répandue.

Dans les chaudières à basse pression, la *surface de chauffe* comprend toutes les surfaces soumises tant à l'action directe du foyer qu'à celle des gaz chauds.

Le niveau de l'eau dans le corps ne doit jamais descendre au-dessous du niveau supérieur de la surface de chauffe, sans quoi les parois rougiraient et, lors d'une admission d'eau, elles vaporiseraient subitement une si grande quantité de liquide qu'il en pourrait résulter une explosion.

Le niveau de l'eau à l'intérieur est indiqué à chaque

instant par la hauteur du liquide dans un tube de cristal placé extérieurement, et formant vase communiquant avec la chaudière.

Un *manomètre* permet de suivre les variations de pression de la vapeur.

Générateurs à haute pression. — Ils sont aussi dénommés générateurs tubulaires et multitubulaires en raison du grand nombre de *tubes* qui forment les bouilleurs.

Ils réalisent sur les générateurs à basse pression des avantages considérables : augmentation de la surface de chauffe, à encombrement égal ; économie de combustible, absence à peu près complète de dangers d'explosion dans le sens propre du mot, facilités de réparations en cas d'accident à un tube. Enfin ils permettent de produire de la vapeur, dont la pression peut être poussée jusqu'à 30 atmosphères.

Un générateur tubulaire comprend trois parties distinctes :

Le *corps*, vaste cylindre qui joue le même rôle que dans le cas d'une chaudière à basse pression.

Un faisceau formé d'un plus ou moins grand nombre de *tubes* parallèles, inclinés d'environ 30° sur l'horizontale. Les tubes situés dans un même plan vertical communiquent généralement entre eux et forment un *élément*.

Des *collecteurs* en nombre égal à celui des éléments, font communiquer ensemble les tubes et le corps.

Pour les chaudières de cette catégorie les foyers sont construits suivant des modèles spéciaux à chaque constructeur, mais ils procèdent à peu près tous du même principe.

La chaudière est enfermée dans un cube en maçon-

nerie, le corps en émerge, et la porte du foyer est placée sous l'extrémité surélevée des tubes ; un mur de soutènement s'élève de la sole, et vient supporter les tubes en leur milieu.

La partie antérieure des tubes est seule soumise à l'action directe des flammes du foyer ; celles-ci entourent le faisceau de tubes et circulent dans les intervalles qui

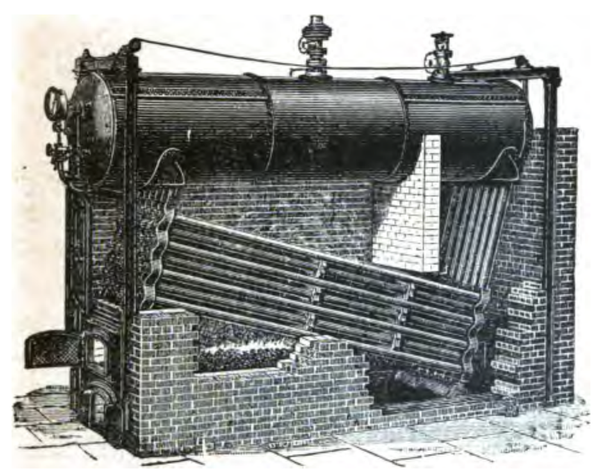


Fig. 8. — Chaudière multitubulaire Babcock et Wilcox.

les séparent et elles échauffent ainsi chacun d'eux sur toute sa surface. Brisés contre le mur de soutènement, les flammes et les gaz s'élèvent au travers du faisceau de tubes, lèchent la paroi inférieure du corps, et pénètrent dans la seconde chambre du foyer, traversent le faisceau de tubes et s'échappent par un carneau qui les conduit à la cheminée.

On se rendra compte aisément de la multiplication de la surface de chauffe par la subdivision tubulaire des bouilleurs primitifs, et de sa bonne utilisation par le

brassage des gaz, tant contre les tubes que contre les murs de soutènement.

Une chaudière Babcock et Wilcox de 92 mètres carrés de surface de chauffe produit à l'heure 1200 kgs de vapeur à 14 atmosphères : elle nécessite 20 mètres cubes de maçonnerie ordinaire et 5 mètres cubes de maçonnerie en briques réfractaires.

Chauffage de l'eau d'alimentation. — Dans une installation importante il y a intérêt à alimenter la chaudière avec de l'eau réchauffée ; on peut réaliser ce but en utilisant la vapeur d'échappement des machines, et en outre porter cette eau à une température bien plus élevée encore en la faisant circuler dans des *surchauffeurs* formés de tubes que lèchent les gaz chauds qui vont à la cheminée.

Ces appareils s'appellent *réchauffeurs* ou *économiseurs*. Leur emploi entraîne une économie notable du combustible brûlé sur la grille de la chaudière.

Chaudières à surchauffeur. — Préconisé il y a fort longtemps, ce système est tombé dans un oubli d'où il semble vouloir sortir : On a reconnu que la *surchauffe* de la vapeur destinée à l'alimentation d'un moteur réalise une économie.

MM. Phail et Limpson ont établi une chaudière à surchauffeur qui a été expérimentée par M. Crosland, ingénieur en chef de la *Boiler Insurance and Steam Company* à Manchester, et ils ont obtenu un rendement en vapeur satisfaisant, comme on en pourra juger par les chiffres ci-dessous.

Le problème à résoudre, simple à première vue, présente cependant de nombreuses difficultés à vaincre. Il faut éviter de porter la vapeur à une tempéra-

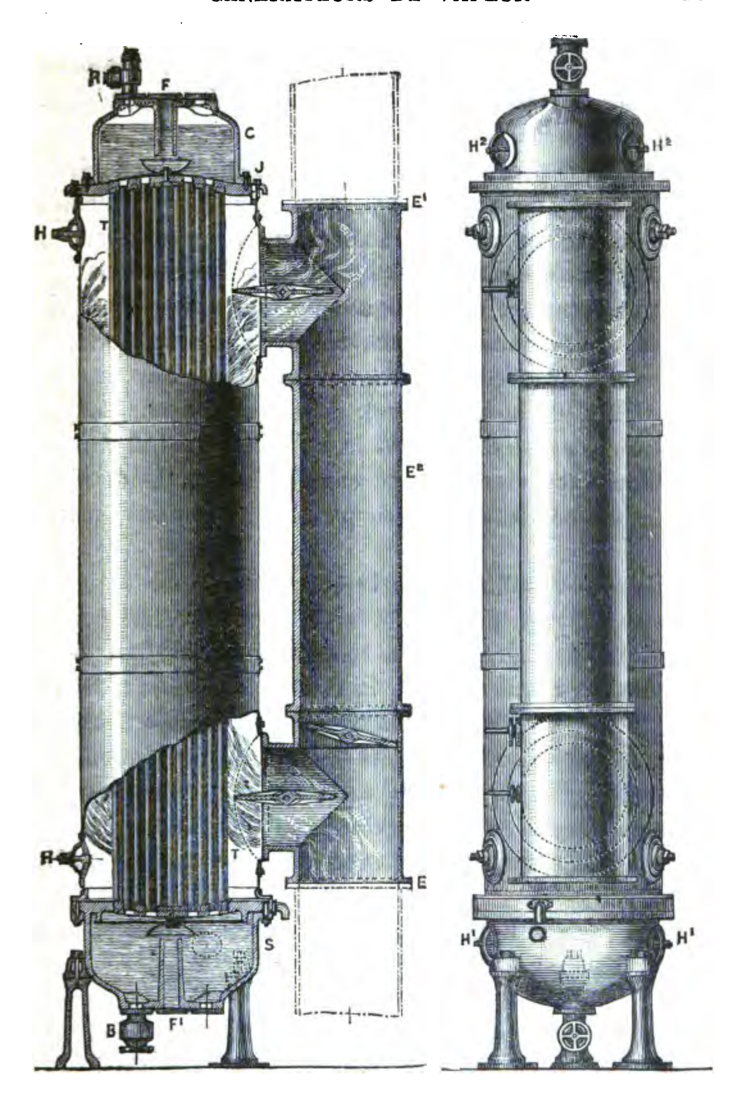


Fig. 9. et 10. — Réchauffeur Babcock et Wilcox.

ture trop élevée, et que la vapeur entraîne de l'eau.

La chaudière qui a subi les essais dont nous venons de parler était à deux bouilleurs, à deux foyers intérieurs avec chacun cinq tubes Galloway.

A l'arrière de la chaudière se trouvent deux séries, isolées l'une de l'autre, de tubes repliés qui forment chacune une des moitiés du surchauffeur : ces tubes sont chauffés par les gaz perdus du foyer de la chaudière.

La vapeur sort de la chaudière, passe dans l'une des moitiés du surchauffeur, pénètre par une canalisation en U (dont les grandes branches sont parallèles aux grandes dimensions de la chaudière), dans l'un des corps de la chaudière, passe de là dans la deuxième moitié du surchauffeur, traverse par une canalisation en U identique à la première le second corps et de là se rend au moteur.

La chaleur prélevée par le surchauffeur sur le gaz de la combustion sert donc à la fois à assurer la siccité de la vapeur et à augmenter la température de l'eau de la chaudière, ce qui favorise la circulation du liquide. Du reste, après la première surchauffe, la vapeur traverse les couches les moins chaudes de l'eau, et après la seconde surchauffe elle traverse au contraire les parties les plus chaudes et augmente la production de vapeur.

Dans ces conditions, la surchauffe ne dépasse guère 10 à 15°.

Voici les résultats obtenus avec cette chaudière non munie, puis munie du surchauffeur :

Diamètre de la chaudière	2,30 mètres
Longueur	8,50 —
Diamètre des foyers	0,90 —
Surface de chauffe de la chaudière.	83,24 mètres ²

Surface de la grille	2,78	—
Rapport entre ces surfaces	29,86	

L'adjonction du surchauffeur développe une surface de chauffe supplémentaire de 43,10 m^2, de sorte que la surface de chauffe totale devient 126,34 m^2 et que son rapport avec la surface de grille devient 45, 33.

Voici quelques-uns des chiffres obtenus :

Pression moyenne de la vapeur	6 kg.
Température de la vapeur saturée à cette pression . . .	164°
— — après la première surchauffe.	218,3°
Température de la vapeur après la deuxième surchauffe.	219°
Température de la vapeur à la sortie	169°
Augmentation de température due à la surchauffe. . .	5°

Les quantités d'eau évaporées *sans* et *avec* l'emploi du surchauffeur sont respectivement les suivantes :

Par kilogramme de charbon sec, 8,67 et 11, 29 kilog.
— — net, 7, 74 et 10,05 —

Les rendements calorifiques s'établissent donc respectivement à 48 et 76,25 °/₀, ce qui crée en faveur du surchauffeur une différence de 18 °/₀.

Le point faible de ce système serait la difficulté de nettoyer les conduites de vapeur du surchauffeur.

De l'eau d'alimentation. — L'eau destinée à l'alimentation des chaudières doit être exempte de substances minérales, qui peuvent corroder les parois métalliques avec lesquelles elle se trouve en contact.

Quand ces sels sont calcaires, magnésiens, ils se déposent, sous forme de croûte solide, sur la paroi intérieure des bouilleurs ou des tubes à laquelle ils adhèrent.

La paroi n'étant plus refroidie par le contact direct

de l'eau, il suffit, quand la chaudière est en pleine charge, que cette croûte se détache en un endroit pour qu'il en résulte une surproduction de vapeur qui peut donner lieu à une explosion.

Il est donc de toute importance de n'employer que des eaux douces ou *épurées* chimiquement. Si l'on ne peut le faire, la chaudière doit être fréquemment nettoyée pour faire tomber tous les dépôts.

Conduite des chaudières. — Le fonctionnement d'une chaudière comporte trois phases principales :

1. — L'allumage ;
2. — La conduite ;
3. — L'extinction ;

que nous allons résumer rapidement :

Allumage. — Le chauffeur doit tout d'abord s'assurer que la chaudière est pleine d'eau, puis après avoir placé les robinets de communication d'eau et de vapeur dans la position *ouverte*, décrasser la grille, vider le cendrier et remplir d'eau la cuvette.

Puis il met sur la grille un tas de chiffons gras ou de papier avec du bois et un peu de charbon qu'il enflamme, et il ferme la porte du foyer après avoir ouvert le registre et la porte du cendrier.

Quand le feu est pris, il ajoute peu à peu du combustible, de manière à recouvrir la grille d'une couche uniforme de combustible en ignition.

L'épaisseur de la couche est en moyenne de 12 centimètres avec la houille, 17 à 18 centimètres avec le coke.

Conduite. — Le chauffeur doit surveiller l'alimentation par les indications du tube de niveau d'eau. Le niveau ne doit pas descendre en-dessous la flèche qui

correspond à une hauteur d'eau de 6 centimètres au-dessus du plan supérieur de chauffe.

Le chauffeur doit maintenir sur la grille une couche uniforme de combustible qui doit, sur toute son étendue donner une flamme claire et brillante.

La consommation de charbon pour un générateur à grand corps est de 60 kgs par mètre carré de grille et par heure ; pour une chaudière tubulaire cette consommation doit correspondre à la vaporisation de 10 à 12 kgs d'eau par mètre carré de surface de chauffe et par heure.

On active la combustion en ouvrant la porte du cendrier et le registre ; la manœuvre inverse ralentit la combustion.

Le décrassage de la grille se fait quand le feu est tombé, soit toutes les 6 ou 7 heures.

Arrêts. — Si l'arrêt n'est que de courte durée, 1 heure par exemple, le chauffeur doit faire tomber le feu, décrasser la grille, mettre du combustible frais, faire bon niveau d'eau et fermer le registre et la porte du cendrier.

Pour un arrêt de plusieurs heures, on opère comme ci-dessus mais au lieu de combustible frais, on couvre de poussier mouillé.

Les deux exemples ci-dessus nécessitent une certaine surveillance pour le cas où, le foyer se rallumant, la chaudière reviendrait en pression.

Si la chaudière doit être abandonnée sans surveillance, pendant plusieurs heures, le chauffeur doit jeter le feu à bas.

Nettoyages. — Les dépôts qui se forment, peuvent être *boueux*, *tartreux* ou *savonneux*.

Dépôts boueux. — De temps à autre on détamponne

la chaudière et l'on balaye les dépôts qui ont pu se former.

Dépôts tartreux. — On les prévient par l'emploi de désincrustants *neutres* ; on enlève au marteau les couches adhérentes qui ont pu se former.

Dépôts savonneux. — On ne peut les prévenir que par l'épuration des eaux d'alimentation. On enlève les dépôts comme dans le cas ci-dessus.

Moteurs à Vapeur.

Les moteurs à vapeur se divisent en trois catégories suivant la valeur de la tension que possède la vapeur à sa sortie de la chaudière :

1. — Machines à basse pression — la tension ne dépasse pas 3 atmosphères.

2. — Machines à moyenne pression — la tension ne dépasse pas 8 atmosphères.

3. — Machines à haute pression — la tension est supérieure à 8 atmosphères.

Les machines des deux dernières catégories sont seules employées à la conduite des dynamos.

Si le piston ne reçoit la vapeur que sur l'une de ses faces, la machine est à simple effet ; elle sera à double effet si le piston la reçoit alternativement sur chacune de ses faces.

Les moteurs à vapeur se construisent à simple, double, triple et même quadruple expansion, avec un, deux, trois ou quatre cylindres de diamètre croissant, communiquant entre eux pour l'utilisation la plus complète de la détente de la vapeur.

L'adjonction de cylindres pour l'expansion de la vapeur ne se rencontre que sur les machines puissantes où

elle réalise une économie de vapeur et par suite de combustible.

Quand la tension ne dépasse pas 10 ou 12 atmosphères on leur adjoint un *condenseur*, sorte de *caisse à vide* dans laquelle on produit une pluie d'eau froide. Le condenseur communique avec le cylindre, aspire la vapeur détendue, la condense, et, supprimant ainsi la pression atmosphérique ' qui agirait comme résistance, augmente d'une atmosphère la tension utile de la vapeur d'eau de la chaudière.

La vitesse de rotation des dynamos étant, même pour les plus puissantes, de plusieurs centaines de tours à la minute, les constructeurs ont cherché à réaliser des

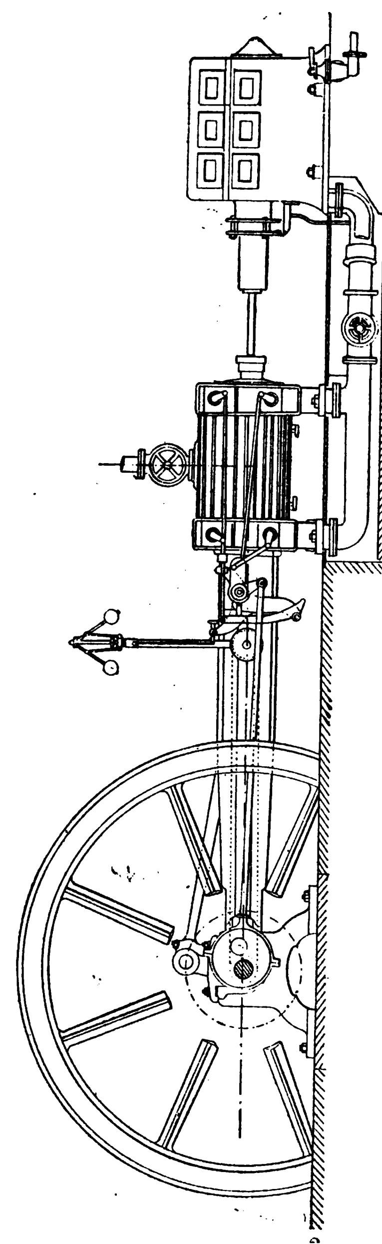


Fig 11. — Machine horizontale à faible vitesse Lecouteux et Garnier.

types de machine à vapeur dont la vitesse permît un accouplement direct à la dynamo.

Ces moteurs, dits à grande vitesse, se construisent couramment aujourd'hui, nous citerons entre autres les moteurs pilon Weyher et Richemond, Sautter Harlé, les moteurs Willans et Westinghouse.

Les machines à grande vitesse sont moins lourdes et d'un prix moins élevé que celles à faible vitesse, mais elles sont sujettes à une usure plus rapide et nécessitent un graissage perfectionné.

Nous donnons à titre de spécimen la machine horizontale Corliss construite par MM. Lecouteux et Garnier.

Machine Willans. — Cette machine à simple effet se construit à simple, double ou triple expansion.

Elle se compose essentiellement d'une tige de piston unique, creuse, à l'intérieur de laquelle se meut un tiroir cylindrique opérant la distribution. La détente est effectuée à pleine course lorsque les orifices percés dans la tige creuse traversent les garnitures ou collets des plateaux des cylindres. Dans les machines compound et triples, les cylindres sont superposés ; les pistons sont fixés sur la tige et se meuvent avec elle.

Les figures 12 et 13 montrent les détails de construction. Chaque tige de piston est pourvue de deux bielles divisant les efforts, et l'excentrique est monté sur l'axe de la manivelle. De plus, une chambre intermédiaire, dite *Récepteur,* entre le cylindre de basse pression et celui de haute pression, reçoit pendant la course ascendante la vapeur qui a servi dans la phase précédente, et cela sans changement appréciable dans le volume et la pression. La chute de température totale

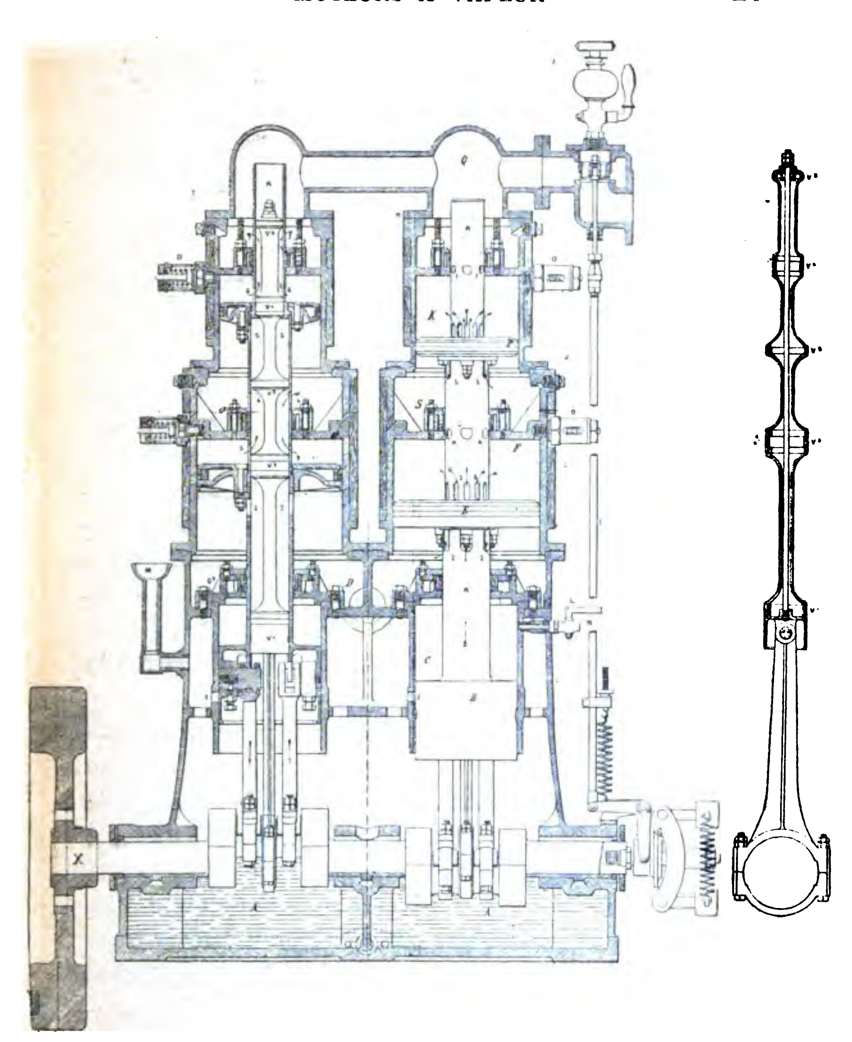


Fig. 12 et 13. — Machine verticale Willans à grande vitesse.

est ainsi fractionnée. Cette combinaison a aussi pour effet de permettre à l'eau de condensation de passer aisément sous le piston et de s'accumuler sans inconvénient au fond du récepteur, d'où elle est extraite par les purgeurs. Elle permet, en outre, la suppression de la contrepression dans le cylindre, contrepression généralement indispensable dans les autres machines et surtout dans celles à simple effet, mais se traduisant nécessairement par une perte de travail.

La pression constante sur l'arbre est obtenue par un dispositif ingénieux. Le piston-guide, à son bas de course, découvre une ouverture I, en communication avec l'atmosphère. L'air qui pénètre alors dans le cylindre-fourreau est comprimé pendant la course ascendante à un degré calculé suivant la vitesse de régime maximum, et maintient ainsi le contact permanent des coussinets des bielles, ce qui explique la marche silencieuse de la machine et l'absence de trépidations.

Le travail absorbé par la compression de l'air est rendu par son expansion à la course inverse.

La régulation a lieu au moyen d'un régulateur à force centrifuge actionnant, par l'intermédiaire d'une tige, un tiroir ou registre réglant l'admission. Un système de ressorts, l'un agissant sur les masses du régulateur, l'autre sur la tige, équilibre les efforts suivant une relation déterminée. La sensibilité de ce mode de régulation est très grande et assure une invariabilité de vitesse presque absolue (à 2 °/₀ près) pour des charges pouvant varier dans de grandes limites.

De la description sommaire qui précède, il ressort qu'une ligne de cylindres constitue réellement dans son ensemble une machine complète. L'addition d'une

deuxième ligne double donc la puissance, et celle d'une troisième la triple. La majeure partie des machines Willans sont à 2 lignes de cylindres ou à deux manivelles, calées à 180 degrés.

Enfin la construction est fondée sur le système inter-

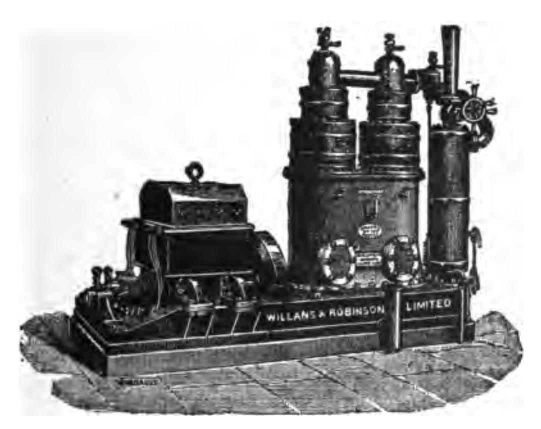


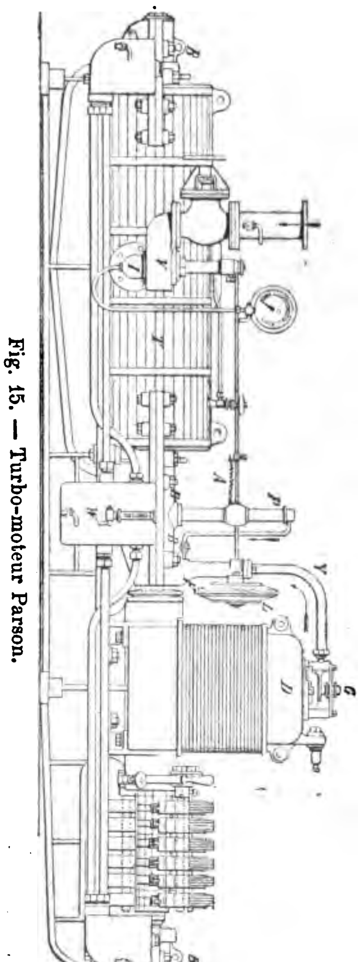
Fig. 14. — Dynamo directement accouplée à un moteur Willans.

changeable, et permet la transformation rapide d'une machine simple en compound ou en triple et réciproquement.

Turbines à vapeur. — A côté des machines à vapeur proprement dites il existe une autre classe de moteurs dénommés *turbines à vapeur, turbo-moteurs* sur laquelle nous donnerons quelques détails en raison des applications récentes auxquelles ils ont donné lieu.

Les turbo-moteurs diffèrent des moteurs à vapeur proprement dits par ce fait que le fluide est conduit à une *turbine;* en outre, ils marchent à une vitesse très élevée de 10.000 à 30.000 tours par minute.

Les deux principaux moteurs de cette catégorie sont ceux de Parson et de de Laval dont nous donnons ci-contre la description.


Fig. 15. — Turbo-moteur Parson.

Turbo-moteur Parson. — Il consiste en deux séries de turbines Jonval, juxtaposées sur un même arbre, de sorte que chaque turbine reçoit la vapeur de la précédente et la passe à la suivante. Ainsi, la vapeur arrivant tout autour de l'axe par l'orifice central d'admission, passe à droite et à gauche en traversant chaque série de turbines jusqu'aux orifices d'échappement. La vapeur se détend à mesure qu'elle perd de la pression au passage de chaque turbine ; et, par degrés successifs, les turbines ou leurs passages libres augmentent de dimensions, proportionnellement à l'accroissement de volume, de manière à maintenir une distribution convenable à travers toute la série. Les aires des turbines successives sont disposées

de façon que le courant de vapeur les traverse avec une vitesse proportionnelle à celle des ailettes; et autant que possible ce rapport est établi pour donner le maximum de rendement. Les deux séries égales de turbines, sur chaque côté de l'admission, équilibrent toute pression longitudinale sur l'axe du moteur et annulent ainsi toute cause d'usure anormale sur les collets des tourillons.

Les turbines sont constituées par des couronnes d'ailettes, alternativement tournantes et fixes. Les ailettes tournantes sont taillées avec inclinaison à droite ou à gauche sur la partie extérieure d'une série de disques en bronze serrés et fixés par des clavettes sur l'axe moteur en acier; les disques des extrémités formant écrous sont vissés sur l'axe et serrent les autres entr'eux. Les ailettes directrices fixes sont taillées avec inclinaison en sens opposé, sur la partie intérieure de rondelles en bronze d'un diamètre plus grand; elles sont coupées par moitié et fixées dans le demi-cylindre supérieur et inférieur de l'enveloppe à l'aide de clavettes. La série d'ailettes de chaque disque mobile tourne entre deux disques d'ailettes fixes. Les passages entre les ailettes dans les disques successifs, forment une série longitudinale de canaux en zigzag lorsque la machine est au repos.

L'induit de la dynamo est monté directement sur l'arbre de la turbine et tourne à la vitesse de 10.000 tours par minute.

L'admission de la vapeur est réglée par une valve qu'ouvre plus ou moins un levier commandé par le champ magnétique de la dynamo. La puissance du turbomoteur varie donc suivant la charge.

Turbine de de Laval. — M. de Laval a eu l'idée d'utiliser seulement la force vive de la vapeur.

Le principe fondamental de sa turbine est que la vapeur à haute pression arrive entièrement détendue sur les aubes de la roue réceptrice. Cette détente s'effectue dans le trajet de la valve d'introduction à l'orifice du tube distributeur de vapeur. Dans ce trajet, elle a acquis une force vive, due à sa propre détente, et qui est précisément égale au travail qu'elle aurait fourni en se détendant graduellement derrière un piston.

Cette force vive est alors transmise aux aubes de la roue, comme celle de l'eau dans une turbine hydraulique.

La turbine de Laval, dont nous empruntons la description au bulletin de la Société Internationale des

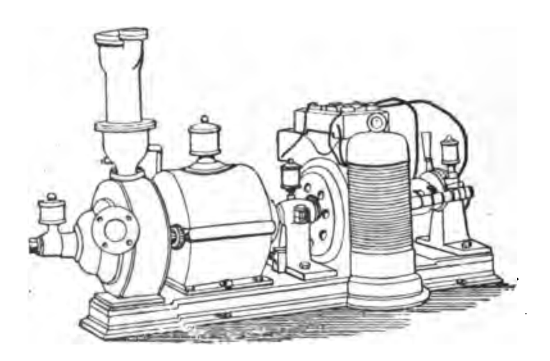


Fig. 16. — Turbine à vapeur de Laval.

Electriciens, est analogue à une turbine d'Euler à axe horizontal, à introduction partielle et à libre écoulement. Celui-ci est, en effet, caractérisé par l'absence d'une surpression entre le distributeur et le récepteur.

Elle se compose d'une roue à aubes, sur laquelle la vapeur, complètement détendue, est amenée par deux ou plusieurs ajutages dont l'axe est faiblement incliné sur le plan de la roue.

Les jets de vapeur pénètrent dans le récepteur en glissant le long des aubes en vertu de la vitesse relative et en leur communiquant la force vive de la vapeur. Cette vapeur sort sur la face opposée du disque avec une vitesse absolue que l'on cherche à rendre le plus faible possible par un tracé approprié des aubes.

Le corps de la turbine est monté sur un axe en acier qui repose sur deux coussinets à ses extrémités, et tout l'ensemble tourne dans une chambre où sont aménagées des ouvertures dans lesquelles viennent se fixer les ajutages distributeurs.

Sur l'arbre principal est placé le pignon s'engrenant avec une roue dentée qui réduit la vitesse de la turbine dans le rapport voulu.

Les dents de ces engrenages sont inclinées de 45° et en sens inverse (engrenages à chevrons) pour empêcher les mouvements longitudinaux. N'ayant à subir que des efforts extrêmement réduits, ils sont faciles à construire. Pour en assurer le graissage continu, on les renferme dans une caisse qui fait partie intégrante du moteur et dans laquelle la circulation de l'huile doit être parfaitement assurée.

A l'extrémité de l'arbre secondaire se trouve le régulateur à force centrifuge, qui agit, par un levier, sur une soupape équilibrée, placée à l'entrée de la vapeur dans la turbine.

La marche de la machine est ainsi assurée, quelle que soit la charge.

En outre, la vapeur, au sortir de la valve d'admission, se répartit en plusieurs endroits, 4, 6, 8, etc., suivant les machines. Ces conduits peuvent être obturés par des valves à main, manœuvrées de l'extérieur, ce

qui permet de réduire à la moitié, au tiers, au quart, etc., la puissance maxima de la machine. On comprend que, par ce moyen, le réglage de la puissance se fasse dans d'excellentes conditions, puisque chaque ajutage fonctionne, pratiquement, d'une manière indépendante. Le rendement peut donc rester excellent.

La vapeur, s'écoulant dans l'air sous pression par un orifice de petite section, prend des vitesses considérables qui atteignent 480 mètres par seconde à la pression de 2 atmosphères à la chaudière, 775 mètres à la pression de 6 atmosphères et 913 mètres à celle de 12. Ces vitesses sont encore notablement accrues quand le second milieu où s'écoule le fluide a une pression moindre que 1 atmosphère. Par exemple, de la vapeur à 6 atmosphères, s'écoulant dans un condenseur où règne une pression absolue de $0^{atm}, 1$, acquiert une vitesse de 1120 mètres.

La vitesse de la vapeur à la sortie des conduits étant énorme, il en sera de même de la vitesse de rotation de la roue réceptrice, laquelle tourne de 15 à 30.000 tours par minute, avec des vitesses linéaires variant entre 175 mètres et 400 mètres par seconde.

Un travail considérable pourra donc être transmis à l'arbre de la roue avec des organes de dimensions extrêmement faibles, transmettant des efforts insignifiants. C'est ainsi que l'effort tangentiel sur une circonférence de 7 centimètres de rayon n'est guère supérieur à 4 kgs, lorsque la machine produit sa puissance de 10 chevaux à 24.000 tours par minute.

Pour une turbine de 10 chevaux, le disque n'a que 12 centimètres de diamètre avec une vitesse de 24.000 tours à la minute : il est de 30 centimètres

pour une turbine de 100 chevaux tournant à 15.000 tours.

L'arbre d'une machine de 10 chevaux n'a que 4^{mm}, 5 à l'endroit le plus faible.

En raison des vitesses de rotation considérables imprimées au disque de la turbine, le montage sur l'arbre de couche présentait de grandes difficultés pratiques. On peut se rendre compte aisément de l'influence d'un vice de montage, par cette seule considération qu'un gramme placé à la circonférence d'un disque de 16 centimètres de diamètre tournant à 24.000 tours est soumis à une force centrifuge de 50 kgs.

La solution adoptée par M. de Laval repose sur les propriétés gyrostatiques d'un corps monté sur un axe flexible.

Si l'on fait tourner un corps qui a un plan de symétrie autour d'un axe maintenu à ses extrémités et passant par son centre de gravité, ce corps tendra, à mesure que la vitesse augmentera, à tourner autour de son axe principal d'inertie, qui est la ligne perpendiculaire à son plan de symétrie et passant par le centre de gravité. L'axe physique étant flexible se déformera de la quantité nécessaire pour lui permettre cette orientation.

La position du disque que, pour plus de simplicité, M. de Laval a pris comme exemple, n'a pas d'influence. Ce disque peut être au milieu de l'axe, à un tiers ou un quart de distance d'un de ses points fixes ; le phénomène se reproduira de la même façon. Le mouvement vibratoire de l'arbre seul changera.

Si l'on fait tourner, au contraire, ce disque autour

d'un arbre flexible perpendiculaire à son plan de symétrie, mais ne passant pas par le centre de gravité, il y aura deux cas différents :

1° Le disque étant placé au milieu de l'axe, entre ses deux points fixes, le centre de gravité tendra à s'en éloigner d'autant plus que la vitesse sera plus grande.

2° Si le disque ne se trouve pas au milieu de l'arbre, celui-ci commencera par fléchir ; mais alors, le plan de symétrie du disque se trouvant incliné par rapport à l'axe géométrique, le disque tendra, à mesure que la vitesse augmentera, à se placer perpendiculairement à cet axe et à ramener, par conséquent, l'arbre dans la ligne des paliers, supposés rigides.

On verra donc le phénomène que nous avons pu constater à plusieurs reprises sur l'appareil de démonstration de M. de Laval. L'arbre flexible avec disque excentrique monté à une certaine distance entre les paliers, lors de sa mise en mouvement, commence par fléchir très visiblement, en décrivant un arc, et finit par se redresser spontanément à partir d'une certaine vitesse. Les frottements qui ont eu lieu au début dans les coussinets, en opposant une résistance sensible à la rotation, disparaissent en même temps ; les vibrations transmises à la masse sont insignifiantes.

La théorie de la turbine de Laval s'établit de la même manière que celle de la turbine d'Euler, à libre déviation, au moins en ce qui concerne la roue réceptrice. Dans la détermination des ajutages distributeurs, il faut faire entrer en ligne de compte les propriétés spéciales des fluides élastiques.

Pour obtenir le maximum de rendement d'une turbine

axiale à libre déviation, on doit, comme on le sait, remplir les conditions suivantes :

L'inclinaison des aubes distributrices doit être aussi faible que possible. L'aube de la roue doit avoir la direction de la vitesse relative à l'entrée, pour éviter les chocs. La vitesse linéaire de la turbine doit être égale à la vitesse relative de sortie du fluide et, par suite, à la vitesse relative d'entrée. Cette condition détermine l'inclinaison des aubes de la roue, qui doit être double de celles des aubes du distributeur. L'angle d'inclinaison des aubes à la sortie doit être le même qu'à l'entrée.

Ces relations s'expriment ainsi :

$$\beta = 2\alpha, \quad c_1 = c_2 = v_1 = v_2$$

et

$$v \text{ (vitesse linéaire de la turbine)} = \frac{v_e}{2 \cos \alpha},$$

v_e étant la vitesse absolue à l'entrée ;

$$v_s \text{ (vitesse absolue à la sortie)} = 2\, v \sin \alpha.$$

Le rendement théorique du distributeur est égal à :

$$\eta = \frac{v_e^2 - v'^2_s}{v_e^2} = 1 - \text{tang}^2\, \alpha.$$

Par exemple, pour $\alpha = 20^\circ$.

$$\eta = 0{,}87.$$

Comme il y a intérêt à réduire α, on voit que, d'une manière approximative, la vitesse linéaire doit être égale à la moitié de la vitesse d'arrivée du fluide, puisque, α étant égal à 0°,

$$v = \frac{v_e}{2 \cos \alpha} = \frac{v_e}{2}.$$

Par exemple, dans le cas de la vapeur à 6 atmosphères, la vilesse périphérique devrait être voisine de 387,5 mètres à la seconde, de 417,5 mètres dans celui de la vapeur à 8 atmosphères, et de 456,5 mètres dans celui de 12 atmosphères sans condensation.

Le travail que peut effectuer 1 kg de vapeur est donné par une puissance vive

$$\frac{v_e^2}{2g}.$$

Ainsi, dans le cas de la vapeur à 6 kg s'écoulant dans l'air, chaque kg représenterait

$$\frac{(775)^2}{19,6} = 30\,600 \text{ kgm} ;$$

dans celui de 8 kg,

$$\frac{(835)^2}{19,6} = 35\,600 \text{ kgm} ;$$

et, dans le cas de 12 kg,

$$\frac{(913)^2}{19,6} = 42\,500 \text{ kgm}.$$

Les 230 kg de vapeur consommés à l'heure dans le premier cas représenteraient, s'ils étaient entièrement utilisés, un travail de

$$\frac{230 \times 36\,000}{3\,600 \times 75} = 25 \text{ chevaux-heure.}$$

Les 800 kg du second cas représenteraient

$$\frac{800 \times 35\,600}{3\,600 \times 75} = 105 \text{ chevaux-heure,}$$

et les 1260 kg du troisième, un travail de 198 chevaux-heure ; soit, avec le rendement théorique maximum de 0,87, respectivement.

22,5, 91 et 172 chevaux-heure.

Or, en pratique, ces quantités de vapeur représentent 10, 50 et 100 chevaux-heure.

En sorte que le rendement générique est de 45,55 et 58 pour 100 respectivement.

Si l'on réfléchit qu'en prenant le chiffre de 0,87 comme rendement théorique, nous n'avons pris en considération ni les frottements dans les ajutages et les aubes, ni les chocs inévitables, on comprendra toute l'importance de ces résultats :

1° Dans toute machine rotative travaillant à grande vitesse angulaire, l'usure des pièces soumises à frottement amène rapidement du jeu entre ces pièces. L'étanchéité étant, pour toutes ces machines, une condition absolue d'économie et cette étanchéité disparaissant rapidement, la consommation de vapeur, qui, au début, reste quelquefois inférieure à 30 ou 40 kg par cheval-heure, atteint très rapidement des chiffres énormes.

Dans la turbine de Laval, au contraire, la force vive de la vapeur agissant seule, et non sa pression, il y a toujours, par construction, entre la roue et son enveloppe, un jeu de 2 millimètres. Aucune pièce n'est donc soumise à des frottements, et la consommation reste constamment la même, quel que soit le temps de fonctionnement de l'appareil.

2° Par principe, la vapeur a la même pression sur les deux faces de la roue. Elle suit donc tout naturellement le chemin que lui offrent les canaux des aubes, ci celles-ci ont bien le profil convenable, et le passage direct à l'échappement est évidemment nul, aussi bien au début qu'après un temps quelconque de fonctionnement.

On vérifie bien cette propriété dans la pratique. Il suffit, en effet, d'ouvrir un des purgeurs de la boîte du

moteur, côté échappement, pour constater que cette vapeur sort sans vitesse, sans brouillard, et c'est là la raison pour laquelle, comme nous venons de le dire, l'inventeur laisse, entre la roue et la boîte enveloppe, un jeu très appréciable, qui supprime tout frottement sur la périphérie de la roue.

3° Les condensations dans la machine sont négligeables quelle que soit la pression de la vapeur utilisée.

En effet, la vapeur est ramenée, par son passage dans les conduits, à la pression d'échappement au moment où elle arrive en contact avec la roue. La vapeur à haute pression, et par suite à température élevée, ne se trouve donc jamais en contact avec cette roue, qui n'a pas à subir, comme les cylindres des machines à piston, des alternatives de haute et basse températures, cause essentielle des condensations.

Les conduits peuvent, d'ailleurs, être mis entièrement à l'abri de l'action refroidissante de l'air, et c'est là le cas de la turbine de Laval, où ils sont absolument noyés dans des épaisseurs relativement considérables de matières.

4° L'utilisation de la vapeur est poussée à sa limite, puisqu'elle passe, dans les conduits, de la pression à la chaudière à la pression de l'atmosphère extérieure. Il en résulte, pour cette machine, une consommation de 9 kg de vapeur par cheval-heure pour des turbines de 50 chevaux, à 8 kg de pression d'admission, marchant à condensation, et de 7,5 kg pour celles de 200 chevaux, à 12 kg de pression d'admission.

5° La turbine de Laval ne contient donc, comme

seul organe en mouvement, qu'une roue tournant librement dans la chambre à vapeur et un train d'engrenages.

C'est ainsi qu'au point de vue du poids une turbine

de 5 chevaux ne pèse que 130 kg soit 26 kg par cheval de puissance
de 10 — — 200 — 20 — —
de 15 — — 235 — 16 — —
de 35 — — 410 — 14 — —

Les encombrements sont donnés par les chiffres ci-dessous :

Puissance en chevaux	Longueur en mm	Largeur en mm	Hauteur en mm
5	795	365	730
10	915	485	880
15	1 000	485	880
20	1 045	620	1 020
30	1 135	620	1 020
50	1 880	940	1 335
100	2 450	950	1 730

Résultats d'essai d'une turbine de 50 *chevaux*. — L'essai a duré huit heures, de 9 h 45 du matin à 5 h 45 du soir, et, pendant ce temps, on a consommé 617,5 kg de charbon de South Yorkshire et 4561 kg d'eau d'alimentation à une température de 15°, 4 C.

La puissance était mesurée au moyen de freins appliqués aux deux arbres qui tournaient à la vitesse de 1645 tours environ par minute.

La vapeur était produite par une chaudière tubulaire avec chambre à feu intérieure, et la pression dans la chaudière était de 8,6 kg par centimètre carré au-dessus de la pression atmosphérique.

Le moteur était placé à côté de la chaudière. Entre

celle-ci et le moteur existait un séparateur pour l'eau condensée.

La pression dans la turbine était observée à un manomètre-contrôleur, placé entre le régulateur et les embouchures à vapeur de la turbine. Cette pression variait de 8,6 à 7,6 kg par centimètre carré ; ces variations étaient causées par le régulateur et provenaient des irrégularités de serrage des freins.

La pression dans l'échappement est restée, pendant tout l'essai, constante et égale à 0,12 kg par centimètre carré (pression absolue), ou 0,67 centimètre de vide.

La vapeur était, à sa sortie, condensée dans un condenseur-éjecteur, système Koerting, qui était alimenté par une pompe centrifuge actionnée par une autre turbine recevant sa vapeur d'une chaudière particulière. L'eau d'alimentation de la chaudière était chauffée par la vapeur du condenseur de 7° C. à 16° C.

Pendant tout l'essai, qui s'est continué sans interruption ni variation d'effet appréciable, la turbine a développé 63,7 chevaux effectifs.

Ainsi par cheval et par heure :

la consommation de vapeur a été de

$$\frac{4651}{8 \times 63,7} = 8,95 \text{ kg},$$

et la consommation de charbon de,

$$\frac{617,5}{8 \times 63,7} = 1,21 \text{ kg}.$$

Conduite des machines a vapeur. — *Mise en marche.* — Après avoir graissé toutes les surfaces frottantes, on

ouvre la prise de vapeur de la chaudière puis la vanne du régulateur et les robinets de purge pour chasser l'eau condensée sur les parties froides du mécanisme.

L'admission de vapeur se fait peu à peu de façon que la machine parte lentement.

Quand les robinets de purge ne laissent plus échapper que de la vapeur, on les ferme.

Conduite. — Il y a lieu de surveiller, outre le graissage, le fonctionnement des appareils accessoires conduits par la machine, pompe de bâche, pompe alimentaire, et on devra rechercher toute cause de bruit anormal, grincement, battement, etc.

Arrêt. — On fermera la prise de vapeur sur la chaudière, on ouvrira les robinets de purge et, après arrêt de la machine, on fermera la vanne du régulateur.

Moteurs à Gaz.

On répartit les moteurs à gaz en deux grandes catégories :

1. — Les moteurs *sans compression* dans lesquels le gaz tonnant n'est pas comprimé avant l'explosion ;

2. — Les moteurs *à compression* qui sont alimentés par un gaz tonnant préalablement comprimé avant l'explosion.

Une troisième catégorie comprend ceux dont le piston ne travaille qu'au retour, après l'explosion, sous l'influence de la pression atmosphérique seule.

Certains moteurs dits *mixtes* n'appartiennent d'une façon rigoureuse à aucune des catégories précédentes.

Moteurs sans compression. — Pendant une partie de sa course le piston aspire le mélange tonnant, sous la

pression atmosphérique ; puis, à un moment convenable, il obture l'admission. Une source de chaleur, flamme de gaz, tube incandescent, étincelle électrique, ou autre dispositif enflamme le mélange, et l'explosion se produit : le piston est poussé en avant.

Quand la pression est redevenue presque égale à la pression atmosphérique, vers la fin de la course du piston, la communication avec l'atmosphère est rétablie et pendant le retour, le piston rejette les produits de la combustion.

Deux courses forment le cycle, et une fraction de course seulement est motrice.

Moteurs à compression. — Le mélange gazeux est tout d'abord comprimé, ce qui a pour effet d'élever sa température, puis il est introduit dans le cylindre et enflammé comme ci-dessus.

Moteurs atmosphériques. — Ils peuvent être établis pour travailler avec ou sans compression préalable.

GAZ. — On peut employer le *gaz d'éclairage* dont la composition est la suivante :

Nature du gaz	Composition	
	en volume (litres)	en poids (grammes)
Hydrogène	1116	150
Oxyde de carbone	119,6	150
Azote	79,6	100
Gaz des marais	683,3	490
Ethylène	103,6	130
Hydrocarbures divers	12	30
	2114,1	1050

Il faut 11 400 litres d'air pour brûler un kilogramme de gaz. Un mètre cube de gaz dégage 5 520 calories.

Le *gaz pauvre*, mélange de gaz oxydables, peut être employé avec succès, et l'on trouvera dans le cours de cet ouvrage la description d'installations qui l'utilisent à la production de la force motrice.

Le gaz pauvre est un mélange d'hydrocarbures, d'hydrogène et d'oxyde de carbone ; il est préparé dans des appareils dénommés *gazogènes*.

Voici la description de celui de Dawson, l'un des plus répandus :

Le gazogène Dawson est formé de six parties essentielles : 1° une petite chaudière timbrée à 4 kg et capable de produire par heure, suivant la puissance de l'appareil, de 5 à 50 kg de vapeur surchauffée ; 2° le gazogène proprement dit, en tôle, garni intérieurement d'un épais revêtement de briques réfractaires et portant une grille à sa partie inférieure ; 3° le refroidisseur constitué par une série de tuyaux ; 4° un barillet ; 5° un épurateur à sciure de bois ; 6° un gazomètre au fond duquel est placé un épurateur à coke dit « scrubber ». Le gazogène est tout d'abord rempli de coke ou d'anthracite que l'on porte à l'incandescence ; la vapeur d'eau passant sur ce charbon incandescent produit la réaction chimique $HO_2 + C = 2H + CO$. Mais, pour que cette réaction ait lieu, il faut que la température dans le gazogène soit maintenue à un degré plus élevé ; comme la décomposition de l'eau absorbe de la chaleur, il faut en rendre à la masse une quantité équivalente ; c'est à quoi l'on arrive en faitant brûler une partie du coke ou de l'anthracite contenu dans le gazogène. A cet effet, la vapeur surchauffée est injectée sous la grille mélangée avec de l'air.

Il se produit de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone par l'action du carbone sur l'eau ; d'autre part, l'oxygène de l'air injecté dans la masse de charbon en brûle une partie et donne également de l'oxyde de carbone. Les deux gaz combustibles produits, hydrogène et oxyde

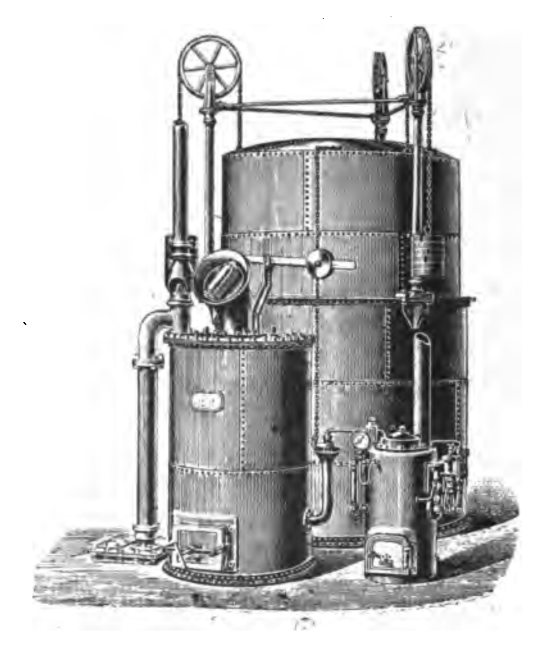


Fig. 17. — Gazogène Dawson.

de carbone, restent mélangés à l'azote de l'air. Aussi le gaz Dawson contient-il, à volume égal, moins d'éléments combustibles que le gaz produit par la distillation de la houille. Pour cette raison, on désigne quelquefois le gaz Dawson sous le nom de *gaz pauvre*. On voit par ce qui précède que, pour obtenir avec le gaz Dawson la même

puissance calorifique qu'avec du gaz de houille, il faudra prendre un volume plus considérable du premier. Mais cela n'a pas d'inconvénient, car il faut, pour composer le mélange détonant destiné à mettre en mouvement un moteur à gaz, beaucoup moins d'air avec le gaz Dawson (1,5 volume d'air pour 1 de gaz) qu'avec celui de houille (6 volumes d'air pour 1 de gaz).

Il faut environ 4 mètres cubes de gaz Dawson pour faire l'équivalent calorifique d'un mètre cube de gaz de houille. Quand on emploie le gaz d'eau pour produire la force motrice, on doit compter que le moteur ne donnera que 80 à 85 °/₀ de la puissance maxima qu'il donnerait avec du gaz de houille.

Nous avons dit que le gazogène se chargeait de coke ou d'anthracite. Il faut observer que les charbons gras, demi-gras ou bitumineux, sont impropres à la production du gaz Dawson. Ces charbons dégageraient en effet des vapeurs de goudron qui se condenseraient dans les tuyaux et boucheraient les brûleurs, ou les soupapes s'il s'agit d'un moteur. Jusqu'à présent, on n'a guère employé que l'anthracite du pays de Galles, mais des expériences nombreuses attestent que plusieurs mines du Midi et du Centre de la France fournissent des combustibles parfaitement couvenables pour la fabrication du gaz d'eau.

Le prix de la tonne de combustible peut être compté de 25 à 35 fr. Or, comme il faut 1 kg de combustible et 350 grammes de vapeur pour faire 4 mètres cubes de gaz, ce volume, équivalent calorifique de 1 mètre cube de gaz de houille, revient de 2,5 à 3,5 centimes. Le charbon nécessaire à la production de la vapeur est compris dans ce chiffre.

En dehors de l'eau vaporisée dans la petite chaudière, le barillet demande un courant d'eau fraîche de 100 à 150 litres à l'heure.

Si l'on tient compte des frais d'amortissement et d'entretien, le prix de revient s'élève à 4 centimes pour les grands et 6 centimes pour les petits appareils. La conduite de l'appareil est de la plus élémentaire simplicité. Le gazogène se charge toutes les demi-heures sans arrêt dans la marche. On nettoie la grille toutes les douze heures et l'ensemble de l'appareil tous les mois. Si le décrassage du feu est fait soigneusement, on peut arriver à ne jamais avoir besoin de jeter le feu à bas, sauf dans les petits appareils.

Pour pouvoir marcher au gaz Dawson, les moteurs à gaz doivent être légèrement modifiés. La *compression* dans le cylindre est augmentée, la soupape d'admission de gaz est plus grande, et celle de l'air est réduite.

Voici, d'après M. Forster, la composition d'un gaz Dawson obtenu avec de l'anthracite de Swansea :

Nature des gaz	Composition	
	en volume (litres)	en poids (grammes)
Hydrogène	187,3	26,78
Oxyde de carbone	250,7	314,38
Gaz des marais	0,1	2,22
Ethylène	3,1	3,88
Azote	489,8	615,18
Acide carbonique	65,7	129,43
Oxygène	0,3	0,43
	997	1092,3

Sa densité est 1,082, soit 0,833 par rapport à l'air.

Sa chaleur de combustion est de 1 432 calories par mètre cube.

Il faut 1 118 litres d'air pour brûler 1 mètre cube de gaz Dawson.

Air carburé. — Le gaz tonnant peut être préparé par la carburation de l'air.

Les *carburateurs à froid* saturent l'air de vapeur de pétrole ; un moteur refoule le mélange sous pression dans un gazomètre ou le cylindre du moteur.

Ils fournissent un gaz à une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Les *carburateurs à chaud* contiennent le pétrole, que traversera l'air aspiré par le moteur lui-même. Ils fournissent le gaz à la pression atmosphérique.

Moteurs a gaz. — Les plus répandus sont ceux de Niel, Otto, Crossley, Delamaire, Boutteville et Malandin, tous du type à compression.

Le *moteur Crossley* sur lequel nous insisterons, fonctionne à 4 temps comme celui d'Otto.

La distribution se fait au moyen d'un arbre latéral portant des cames qui commandent les soupapes d'admission ; le tiroir est supprimé et l'allumage se fait au moyen d'un tube incandescent.

Le nouveau type de moteurs Crossley présente sur les anciens moteurs Otto quelques avantages accessoires qui ont été obtenus sans qu'on les recherchât spécialement. On sait que l'échauffement graduel du cylindre d'un moteur marchant un certain temps à pleine charge lui fait perdre un peu de sa puissance ; dans les nouveaux moteurs, à cause sans doute du rafraîchissement produit par le passage répété de courants d'air dans la chambre de combustion, on peut marcher à la puissance maxima

pendant plusieurs heures de suite sans voir diminuer la puissance.

On a souvent remarqué aussi qu'avec les gaz pauvres, tels que le « Dawson », la machine ne donne pas toujours

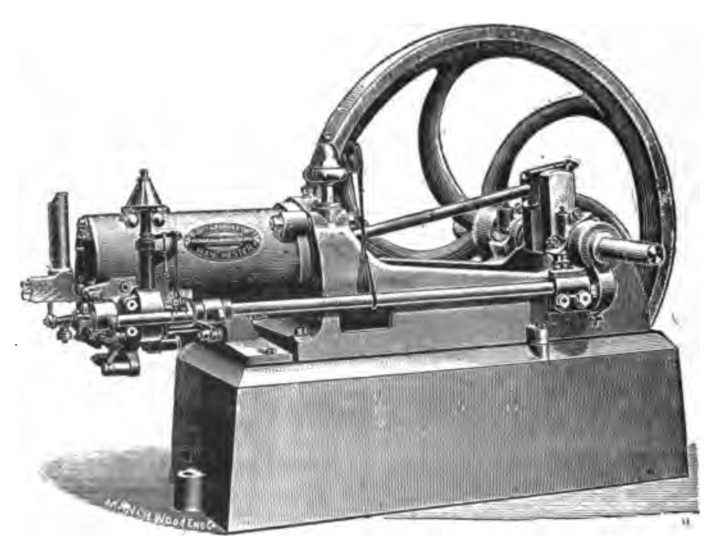


Fig. 18. — Moteur Crossley.

ce que l'on serait en droit d'attendre d'elle, le combustible producteur du gaz étant de qualité inférieure. Avec le nouveau moteur, rien de semblable à craindre ; le gaz, même un peu trop pauvre, n'étant plus mélangé qu'à de l'air pur, s'enflamme toujours d'une façon satisfaisante ; de plus, la pression moyenne est augmentée par le fait qu'on introduit à chaque aspiration un plus grand volume de gaz combustible dans le cylindre.

Un examen superficiel pourrait faire croire que les nouveaux moteurs doivent être construits d'une façon

bien plus robuste que les anciens, parce que la pression moyenne est plus élevée. C'est une erreur, attendu qu'il faut tenir compte, pour le calcul des résistances, non des pressions moyennes, mais bien des maxima de pression. Or, dans tous les moteurs à gaz, il peut arriver qu'un tube insuffisamment chaud n'allume pas la charge ; les gaz s'accumulent ainsi pendant deux ou trois tours de volant et produisent subitement une explosion bien plus violente que celle sur laquelle on compterait normalement ; et l'expérience a démontré que le maximum de pression obtenu dans des cas semblables n'est pas moindre avec les « Otto » qu'avec les « Crossley-Atkinson. »

Le moteur Crossley a été l'objet d'un rapport de M. Aimé Witz, rapport dont les extraits ci-dessous indiquent les éléments à déterminer pour l'appréciation d'un moteur à gaz.

Le moteur Crossley, installé chez MM. Wallaert frères, pour l'éclairage électrique de leur filature de la rue de Poids, à Lille, attaque par une courroie une transmission intermédiaire, sur laquelle sont montés un embrayage par poulies folle et fixe, un joint Raffard à connexions élastiques et un volant de 1,10 m de diamètre, pesant 750 kg. Cet arbre, qui fait 350 révolutions par minute à la vitesse angulaire de 160 tours du moteur, transmet le mouvement par une seconde courroie à une dynamo faisant 1000 tours par minute.

Le moteur est du type *X*. Il occupe un emplacement de 3,66 m sur 2,50 m, y compris deux volants de 1,761 m de diamètre. Son cylindre a un diamètre de 335 mm et le piston une course de 530 mm. L'alimentation se fait avec du gaz de ville et la compression initiale est d'environ 5 kg.

L'allumage est effectué par un tube incandescent ; le brûleur qui le maintient au rouge consomme 250 litres de gaz à l'heure.

La puissance effective du moteur a été mesurée par un frein à cordes, qui pouvait être appliqué sans peine sur les deux volants. Ce frein était à deux brins embrassant toute la circonférence de la jante : l'extrémité supérieure était amarrée à un point fixe, par l'intermédiaire d'un petit dynamomètre à ressort, dont la charge f' devait être décomptée de la valeur du poids f attaché à l'autre extrémité flottante des brins : la charge effective F était donc égale à $f - f'$. Comme le frein était double, on avait moins de 20 chevaux à développer sur chaque volant. La disposition des lieux et la forme des volants ne se prêtaient malheureusement pas à un refroidissement des jantes, et l'on a dû réduire la durée des expériences, de crainte de trop échauffer le métal. Par contre, on a déterminé avec le plus grand soin les valeurs de f et de f' et mesuré rigoureusement les diamètres des jantes, qui étaient de 1,761 m et 1,762 m ; les brins avaient 15 mm de diamètre.

La consommation de gaz était relevée par un compteur spécial, disposé dans une salle à température constante : cette température n'a pas varié sensiblement et elle est restée égale à 24°. C. Un essai préalable avait déterminé l'importance des fuites et des pertes de la canalisation et des poches de régulation. La pression atmosphérique moyenne a été notée sur un baromètre de précision.

Le pouvoir calorifique a été de 5 011 calories le 26, et de 5 024 calories le 27 octobre 1892, dates des essais ; les volumes étant réduits à 0° et 760 mm, et la combustion ayant lieu à volume constant.

Numéro de l'essai	Conditions de l'essai	Durée	Vitesse angulaire moyenne ω tours : min.	Charge F au frein en kg	Puissance effective en chx	Nombre d'explosions n	Pression moyenne p_m, en kg : cm²	Puissance indiquée en chx	Rendement organique	Pression atmosphérique en mm.
1	A vide	15min.	168,8	—	—	15	4,77	7,42	—	759,4
2	Avec transmission	30 —	160,0	—	—	20	5,52	11,50	—	757,0
3	Au frein	15 —	142,8	163,6	28,98	71,4	4,78	35,43	0,820	759,4
4	—	20 —	152,5	189,1	35,77	70,0	5,69	41,35	0,865	757,0
5	—	20 —	161,3	181,1	36,23	74,5	5,31	41,09	0,880	759,4
6	—	25 —	163,36	187,8	38,05	73,0	5,45	43,00	0,884	757,0
7	En éclairage	3 h.	150,68	—	28,54	75,3	4,45	34,81	0,820	757,0

Numéro de l'essai	Conditions de l'essai	Durée	Température du compteur	Pouvoir calorifique du gaz	Gaz consommé dans l'essai	Consommation par heure	Consommation réduite à 0° et 760 mm	Consommation par cheval-heure indiqué	Consommation par cheval-heure effectif	Consommation par cheval-heure effectif brûleur déduit
			C	cal.	litres	litres	litres	litres	litres	litres
1	A vide	15min.	24°	5024	1418	5672	5210	704	—	—
2	Avec transmission	30 —	—	5011	3385	6770	6198	539	—	—
3	Au frein	15 —	—	5024	5042	20170	18526	523	639	632
4	—	20 —	—	5011	8198	24594	22472	543	628	622
5	—	20 —	—	5024	8173	24519	22522	548	622	616
6	—	25 —	—	5011	10554	25330	23190	539	609	603
7	En éclairage	3 h.	—	5011	60660	20220	18511	532	648	641

Les constantes des calculs sont les suivantes :

Puissance indiquée : P_i

$$\frac{sl}{4\,500} = 0{,}10381.$$

s = surface du piston en cm²; l = longueur de course; en m

$4\,500 = 60$ (secondes) $\times$ 75 (kgm).

$$P_i = 0{,}10341 \times n \times p_m \left\{ \begin{array}{l} n = \text{nombre d'explosion} \\ p_m = \text{pression moyenne en Kg : cm}^2. \end{array} \right.$$

Puissance effective : P_e

Circonférence moyenne des volants : 5,5815 m (corde comprise).

$$P_e = \frac{5{,}5815}{4\,500} \times \omega \times F \left\{ \begin{array}{l} \omega = \text{nombre de tours par minute} \\ F = f - f' = \text{charge du frein} \\ \quad \text{totale sur les deux volants.} \end{array} \right.$$

Les diagrammes ci-dessous sont la reproduction, en A, du diagramme moyen du quatrième essai, et, en B, du troisième; pour A, le robinet était pleinement ouvert, tandis que, pour B, le robinet étranglait l'admission du gaz, de manière à ce qu'il y eût autant d'explosions motrices que de compressions. Il est à remarquer que, malgré ces conditions, généralement estimées défavorables, la consommation de gaz, par unité de travail effectué, n'a presque pas changé : c'est que, si le rendement organique baisse légèrement par suite de la diminution du travail, il y a compensation en ce que d'autre part les combustions se

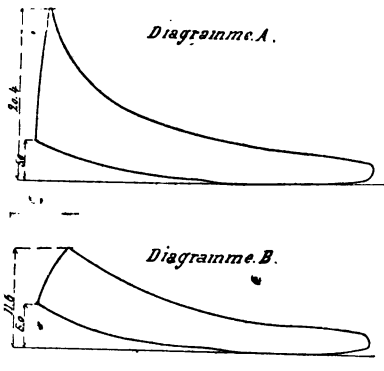


Fig. 19 et 20. — Diagrammes du moteur Crossley.

font mieux dans un cylindre constamment réchauffé par les explosions.

Les consommations observées méritent d'arrêter l'attention, car elles sont vraiment remarquables, vu la pauvreté relative du gaz employé ; une dépense de 603 litres par cheval-heure effectif (brûleur non compris) avec du gaz donnant 5 011 calories au mètre cube équivaut à une dépense de 570 litres avec du gaz possédant un pouvoir thermique moyen de 5 300 calories.

Les qualités du moteur essayé ressortent surtout de l'estimation du rendement thermique fourni dans l'essai n° 6. Le rapport de la puissance effective réellement disponible à la puissance totale qu'aurait pu fournir par sa transformation le calorique dégagé en une heure par le gaz est égal à

$$\frac{75 \times 60 \times 60}{0{,}603 \times 5\,011 \times 425} = 0{,}21$$

Au point de vue de la régularité du moteur, les résultats ont été aussi très satisfaisants ; la vitesse restait bien constante, et, grâce aux deux volants, l'impulsion du coup moteur ne se faisait sentir que d'une manière imperceptible sur les graphiques relevés par l'appareil Otten. La hauteur des hachures ne dépasse pas 2 mm, ce qui correspond à une variation d'environ 1,9 tour sur 150.

Le moteur X convient donc bien à l'éclairage électrique et, de fait, les variations de tension sont très faibles et la lumière est bien fixe.

Constatons en passant qu'on obtient une intensité lumineuse de 4 922 bougies pour une consommation horaire de 18,5 mètres cubes de gaz réduits à 0° et 760 mm ; l'utilisation directe du gaz par des becs Bengel donnerait moins de lumière pour une dépense triple.

Comme la dynamo fournit 16 491 watts avec

110,9 volts et 148,7 ampères, le watt-heure correspond par suite à 1,1 litre de gaz.

Moteur Niel. — Ce moteur du type horizontal suit le cycle à quatre temps et donne une explosion tous les deux tours.

Comme la plupart des machines du même genre, celle qui nous occupe comporte un cylindre formant glissière, la bielle motrice étant directement articulée sur le piston, placé en porte à faux à l'arrière d'un bâti supportant l'arbre coudé, lequel, au moyen de deux engrenages à dents hélicoïdales, dont les diamètres sont dans le rapport de 1 à 2, transmet un mouvement de rotation, deux fois moins rapide que le sien, à un arbre auxiliaire parallèle à l'axe du cylindre et chargé de commander la distribution, l'allumage, la régularisation et le graissage.

Les organes de distribution, d'allumage et de régularisation sont tous groupés d'un même côté du cylindre, à l'extrémité de l'arbre auxiliaire (Fig. 21 et 22). Seule la soupape d'échappement, commandée par un levier actionné par une came calée sur l'arbre auxiliaire, se trouve soit de l'autre côté du cylindre, soit sur le fond même de ce dernier.

L'admission du mélange se fait par l'intermédiaire d'un tiroir conique, qui n'est autre chose qu'une clé de robinet, quand une ouverture percée en travers de celui-ci fait communiquer l'intérieur du cylindre et un conduit par lequel arrive l'air extérieur dans lequel se diffuse, par une série de petites ouvertures, le gaz destiné à la formation du mélange explosif. Les tiroirs rotatifs sont abandonnés depuis longtemps déjà, malgré leur simplicité, leur fonctionnement silencieux, leur

commande facile, etc., en raison des nombreuses chances d'échauffement et de fuites qu'ils présentent ; mais M. Niel est arrivé à obvier sensiblement à ces inconvénients par une construction particulière de son robinet qui fait que celui-ci, possédant en général une certaine liberté dans son boisseau, s'y appuie cependant fortement quand le besoin s'en fait sentir.

Pour cela, le robinet est composé de deux parties. La première, formant la clé proprement dite, est percée transversalement d'une ouverture qui, comme nous l'avons vu précédemment, sert à effectuer l'admission. Quant à l'autre, elle se compose d'une chambre cylindrique dont l'une des extrémités est fermée par un diaphragme en acier portant au centre une vis creuse qui sert à relier les deux pièces entre elles et, à un moment donné, par l'intermédiaire d'un petit conduit la prolongeant, à établir une communication entre le cylindre moteur et l'intérieur de la chambre.

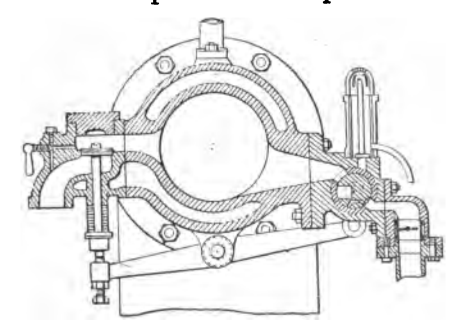


Fig. 21. — Coupe du cylindre et des appareils de distribution et d'allumage du moteur Niel.

Le tiroir ainsi formé est monté libre dans son boisseau, sa liaison avec l'arbre auxiliaire permettant un léger déplacement longitudinal.

Il est maintenu en place par une bride amovible portant une vis mobile contre laquelle, en son centre, s'appuie la tête du robinet.

Cette vis est réglée de telle façon que, à part la période de travail, c'est-à-dire à part le moment où la pression dans le cylindre est assez élevée, le robinet est relativement libre dans son boisseau. Mais, quand l'explosion se produit, la pression augmente brusquement dans le cylindre, et comme, en ce moment, ce dernier se trouve en relation avec la chambre du robinet par le petit conduit dont nous avons parlé, l'équilibre s'établit et le diaphragme s'infléchissant légèrement appuie la clé sur son siège et d'autant plus que la pression dans le cylindre est plus forte.

On obtient ainsi une étanchéité parfaite sans un serrage continu exagéré du tiroir, ce qui facilite le graissage et diminue l'échauffement.

L'allumage se fait au moyen d'un tube d'ignition, c'est-à-dire d'une éprouvette métallique portée extérieurement au rouge par un chalumeau, dans laquelle, au moment de l'inflammation, une partie de la charge comprimée pénètre par l'intermédiaire d'un petit conduit ménagé dans le robinet.

Quant à la régularisation, elle est obtenue par suppression totale de gaz au moyen d'un appareil très ingénieux représenté en détail Fig. 22.

Celui-ci se compose d'un levier oscillant autour d'une de ses extrémités sous l'action d'un excentrique calé sur l'arbre auxiliaire.

Ce levier porte, articulé à son extrémité libre, une sorte de T dont la tête est formée par un ressort plat et la branche par une tige plate terminée en biseau.

Cet ensemble étant entraîné par le levier, quand ce dernier monte les extrémités du ressort viennent frapper contre deux butées d'autant plus vivement que la vi-

tesse est plus grande, ce qui force le ressort à se courber plus ou moins suivant le nombre de tours de la machine.

Pendant la descente du levier, le ressort, en se redressant, lance la tige qu'il porte en avant et d'autant plus vivement que la flexion de ce dernier, et par suite la vitesse de la machine, étaient plus grandes.

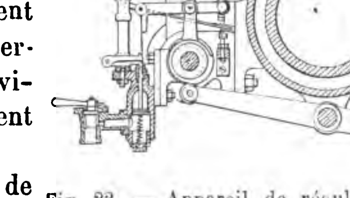


Fig. 22. — Appareil de régularisation du moteur Niel.

Tant que le nombre de tours du moteur est égal ou inférieur à celui pour lequel il a été réglé, le couteau, lancé en avant, atteint une encoche ménagée dans l'extrémité d'un petit levier commandant la tige d'une soupage à gaz qu'il fait ouvrir, afin de permettre la formation du mélange explosif ; mais, si la marche de la machine est trop rapide, le couteau, lancé trop vite en avant, manque l'encoche dont nous avons parlé, et, la soupape à gaz n'étant pas ouverte, aucune explosion ne se produit.

L'appareil que nous venons de décrire est très simple et très efficace ; sa sensibilité est des plus grandes. Il permet de plus, ce qui est un avantage, de faire varier la vitesse du moteur dans des limites assez grandes en agissant sur une vis dont l'extrémité inférieure forme l'une des butées du ressort.

Le graissage du cylindre et du robinet se fait automatiquement à l'aide d'un graisseur mécanique prenant son mouvement sur l'arbre auxiliaire.

Un moteur Niel, d'une puissance nominale de 4 che-

vaux, à 160 tours par minute, a été soumis par M. Lalande, dans le courant de 1890, à une série d'essais dont voici les résultats principaux :

En marche à vide et à 160 tours la consommation moyenne a été de 1 125 litres à l'heure, pour le gaz, et de 73 litres à l'heure pour l'eau.

Pour une puissance au frein de 2,1 chevaux à 160 tours, c'est-à-dire en demi-charge, la consommation d'eau a été d'environ 24 litres par cheval-heure, et celle de gaz d'environ 933 litres dans les mêmes conditions.

Pour une puissance au frein de 3,9 chevaux et un nombre de tours moyen égal à 159, c'est-à-dire en charge normale, la consommation moyenne a été de 111 litres par cheval-heure, pour l'eau, et de 837 litres, environ, par cheval-heure, pour le gaz.

La puissance au frein du moteur a pu être poussée jusqu'à 4,47 chevaux à 160 tours, et 5,3 chevaux à 180 tours.

Dans le premier cas, la consommation a été de 28 litres par cheval-heure, pour l'eau, et d'environ 800 litres, dans les mêmes conditions, pour le gaz.

Dans le second cas, la marche était très anormale : aussi la consommation en gaz a-t-elle été d'environ 1 075 litres par cheval-heure.

Le rendement mécanique, calculé pour les effets maxima, a été de 80 °/₀.

Aux consommations en gaz ci-dessus, il faut ajouter celle du brûleur, égale à environ 150 litres par heure quelle que soit la puissance développée par la machine.

Les diagrammes relevés ont indiqué une pression explosive moyenne de 16 kg par centimètre carré, pour une compression moyenne de 3,500 kg.

Il est établi, depuis longtemps déjà, que le moteur à gazconvient très bien à la production de la lumière électrique et que le gaz ainsi consommé donne un meilleur rendement lumineux qu'avec les becs ordinaires.

Afin de faciliter les petites installations électriques, au moyen de moteurs à gaz, les Américains et les Anglais construisent, depuis un certain temps, des moteurs combinés avec des dynamos.

La compagnie Niel a suivi cet exemple et les figurès ci-dessus représentent la disposition adoptée par elle.

La dynamo du système Rechniewski est montée sur une tablette placée au-dessus du cylindre à l'arrière de la machine.

Pour assurer la constance de la marche, l'arbre de l'induit est muni d'un petit volant et le moteur en comporte deux, au lieu d'un, comme dans les cas ordinaires.

L'un de ces volants transmet directement le mouvement de la dynamo par l'intermédiaire d'une courroie.

L'ensemble ainsi formé est compact, occupe peu de place, est facile à surveiller et à commander.

Moteurs à Pétrole.

Les moteurs à pétrole peuvent être considérés comme une variété de moteurs à gaz qui utilise comme gaz tonnant de la vapeur d'essence légère de pétrole ou d'huile lampante mélangée d'air.

Les moteurs à essence sont appelés à disparaître au profit des seconds en raison du grand écart de prix de l'essence et du pétrole : nous ne parlerons que de ces derniers.

Ils présentent sur les moteurs à gaz l'avantage de pouvoir être installés partout, sans qu'il y ait lieu de les brancher sur une distribution de gaz ou de leur adjoindre un gazogène : leur mécanisme n'est ni plus compliqué ni plus fragile que celui des moteurs à gaz.

Par contre, leur rendement est très variable d'un type à l'autre et pour un même type avec la charge.

Nous donnons ci-dessous, d'après la *Revue Industrielle,* une description du moteur Grob.

Le type vertical qui est le plus courant, est représenté dans les gravures ci-contre ; il porte un arbre à manivelle à sa partie inférieure et un guidage spécial pour la tête du piston. C'est un modèle du genre Pilon.

Le cylindre qui surmonte le bâti, est fermé à sa partie supérieure par une culasse (fig. 23) contenant la soupape d'admission d'air *a*, chargée par un ressort réglable à boudin *b* et communiquant, par un tuyau non figuré, avec l'intérieur du bâti où se fait l'aspiration de l'air nécessaire à la formation du mélange explosif.

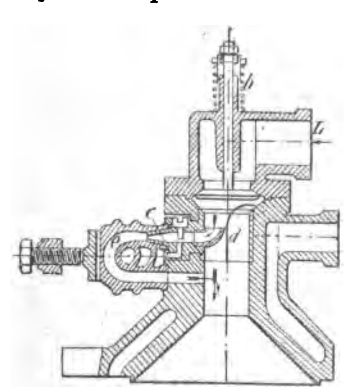


Fig. 23. — Culasse du moteur Grob.

Sur un côté de la culasse se trouve, en prolongement de la cuvette *d*, le pulvérisateur *c* qui débouche dans le vaporisateur *e* chauffé en dessous par une lampe à pétrole *q* (fig. 24) alimentée, dans les installations fixes, par un réservoir en charge de 2 *m* environ relié en P′.

L'hydrocarbure employé est du pétrole lampant d'une

densité de 800 à 850° dont le point d'inflammation n'a lieu qu'à une température relativement élevée (vers 30 à 40°). Ce liquide, également contenu dans un récipient en charge, est envoyé dans le pulvérisateur *c* par une

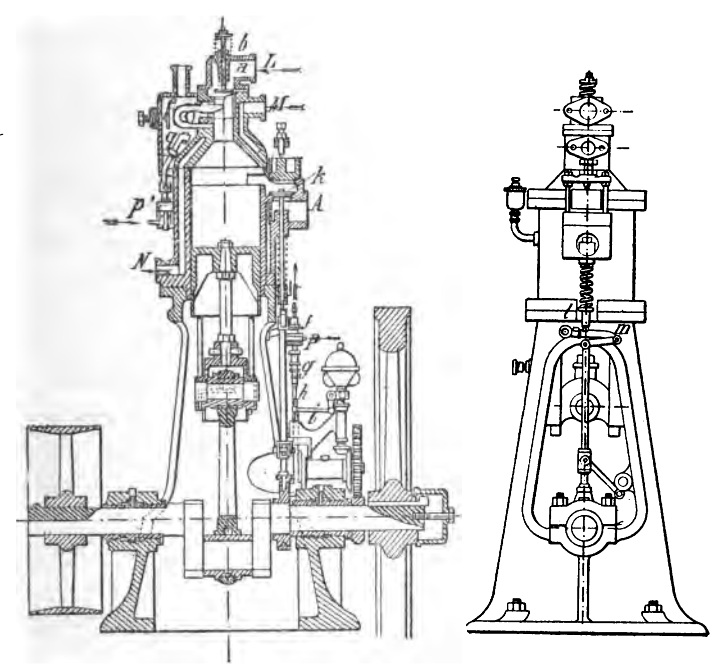


Fig. 24 et 25. — Coupe et élévation.

petite pompe *f* placée à mi-hauteur environ du moteur et soumise à l'action d'un régulateur à boules. Celui-ci est actionné par l'arbre à manivelle au moyen d'un engrenage droit commandant un arbre auxiliaire qui agit, à son tour, sur la tige du régulateur à l'aide d'un engrenage conique.

Sur cet arbre auxiliaire est calé un excentrique dont

la tige, tout en étant indépendante de celle du piston de la pompe, actionne ce dernier lorsque le régulateur le permet. A cet effet, un ressort à boudin S (fig. 26) tend toujours à amener le piston r dans sa position la plus basse ; mais, sa tige porte à son extrémité un taquet articulé t qui, dans la vitesse normale, est soulevé par la tige d'excentrique convenablement guidée dans le support du régulateur ; ce taquet est relié au manchon de ce dernier par une tringle i (fig. 24 et 25) qui, dans le cas d'un excès de vitesse, attire la menotte h et fait échapper le butoir t à la tige d'excentrique ; au surplus, celle-ci peut, dans certaines circonstances, être débrayée à la main.

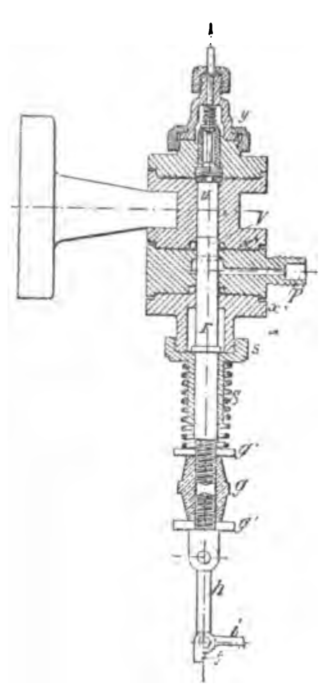


Fig. 26. — Pompe à pétrole.

Quant à la pompe, elle est constituée par un cylindre u dans lequel le pétrole s'écoule par les canaux horizontaux et verticaux V du plongeur r, lorsque celui-ci se trouve dans sa position inférieure ; dès que, par le soulèvement de ce piston, les orifices V dépassent la garniture en cuir x', la communication entre le canal d'amenée P du pétrole et le cylindre u se trouve interrompue. Le pétrole est alors refoulé par la pompe à travers la soupape y dans le pulvérisateur c. Lorsque ce piston

atteint sa position supérieure, cette soupape se referme ; en même temps, il est chassé vers le bas par la détente du ressort S, qui agit jusqu'à l'arrêt de la butée *s'*. La conduite P est alors mise à nouveau en communication avec le cylindre *u* pour son remplissage. La quantité de pétrole injectée dépend de la course effectuée par le piston ; on la règle au moyen d'un écrou *g* engagé par moitié dans des filets de vis inverses pratiqués tant au bout de la tige du piston qu'en haut du support de la bielle *h* ; cet écrou double est maintenu en position par les contre-écrous *g'g'*.

La commande de la soupape d'échappement ne s'effectue pas simplement par la tige d'un excentrique calé sur l'arbre moteur ; au lieu d'être rigide, cette tige consiste en deux parties articulées *ab*, communément avec une courte bielle *c* mise en jeu par une manivelle fixée à l'arbre intermédiaire du régulateur. Cette disposition a pour objet de réduire l'usure de l'engrenage interposé entre ces deux arbres ; en effet, si la soupape d'échappement était uniquement commandée par l'arbre du régulateur, qui tourne à une vitesse moitié moindre que l'arbre de couche, tout l'effort nécessaire pour l'ouverture de cette soupape se porterait sur l'engrenage et, par suite, sur les mêmes dents, qui s'useraient ainsi très inégalement.

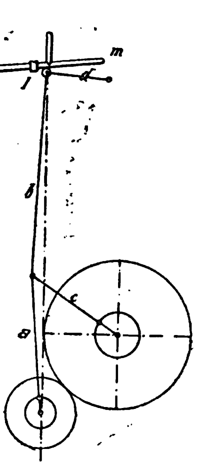


Fig. 27.

Grâce à cette disposition représentée fig. 27, cet effort est exercé en grande partie par l'excentrique de l'arbre

principal, tandis que la bielle courte *c* ne fait qu'ouvrir ou fermer la genouillère *ab* dont le levier articulé *d* soulève ou non un levier *m* sur lequel repose la tige de la soupape d'échappement. Sur ce levier est un coulisseau *l* qu'on amène momentanément sous cette tige, pour éviter la compression à la mise en train du moteur.

Dans ce moteur, le graissage du cylindre est effectué au moyen d'un appareil à gouttes débitant du naphte de très bonne qualité, afin de réduire, au minimum l'encrassement. Les autres organes de frottement sont pourvus de graisseurs à graisse consistante ; la soupape d'échappement n'est lubrifiée qu'au pétrole.

Le fonctionnement s'effectue suivant le cycle à quatre temps bien connu. Par la descente du piston moteur, l'air aspiré à travers le tuyau L et la sonpape *a* passe en grande partie directement dans le cylindre, l'autre partie est amenée par la cuvette *d* au pulvérisateur *c*, dont le jet entraîne, à l'état de division extrême, le pétrole introduit par la pompe *f*. Le mélange est projeté contre les parois du vaporisateur *c* chauffé au rouge par la lampe *q* et il parvient à l'état gazeux dans le cylindre où il subit par son mélange avec l'air admis directement un léger refroidissement.

Les couches les plus riches en pétrole se trouvent dans le voisinage du piston et les plus pauvres vers le haut du cylindre. La stratification de ces couches n'est pas dérangée pendant la compression, de sorte qu'à la fin de la course du piston, la partie riche, rendue encore plus inflammable par la compression, s'enflamme en revenant au contact des parois incandescentes du vaporisateur. Avant la fin de la course motrice, commence par la soupape *k* l'échappement des gaz brûlés.

Pour la mise en train, on chauffe la lampe *q* au moyen d'une lampe à esprit de vin ; il faut 11 minutes environ pour porter à la température convenable le vaporisateur d'un moteur de 2 *chvx*. Quant au rafraîchissement du cylindre, il est produit par un courant d'eau entrant en M et sortant en N.

La figure 28 représente le diagramme d'un moteur de 6 *chvx* tournant à 260 tours par minute ; la compression atteint environ 3 *kg* par centimètre carré, et l'explosion développe, en surplus, une pression de 12 *kg*.

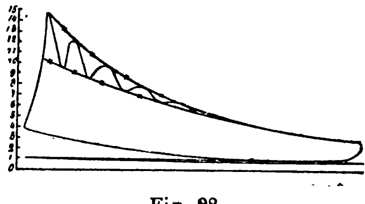


Fig. 28

Y compris la dépense de la lampe, la consommation est de 0,5 *l* de pétrole par cheval-heure pour les petits moteurs et de 0,4 *l* pour les gros moteurs ; la lampe seule brûle pour une machine de 1 à 2 *chvx* 0,166 *l* environ et pour des puissances plus élevées, 0,20 à 0,25 *l*.

Un moteur Grob de 8 *chvx* a fourni dans des essais officiels les résultats suivants :

Diamètre du cylindre.	230
Course du piston	230
Nombre de tours	278
Chambre de compression	4,17 *l*
Volume d'aspiration	9,55 »
Rapport de la chambre de compression au volume de détente . . . . . $\frac{4,17 \times 9,55}{4,17}$	= 3,29 (1)
Consommation de pétrole pour 17 inflammations	10 c^3
Consommation de pétrole par heure	4,9 *l*

(1) Ce rapport s'élève à 4,2 dans les petits moteurs.

Travail indiqué	*chvx*	12,9
Travail effectif au frein	—	10,5
Rendement mécanique		0,81
Consommation du cylindre par cheval-heure indiqué		0,466 *l*
Consommation de la lampe par cheval-heure indiqué		0,023
Consommation totale par cheval-heure indiqué.		0,489 *l*

La Compagnie des moteurs Grob a établi jusqu'à 10 *chvx* un certain nombre de modèles du type vertical Pilon dont les dispositions générales sont représentées figure 29 ; pour les cas où la marche doit être régulière comme pour l'éclairage électrique, elle construit des types verticaux à deux cylindres, qui peuvent aussi trouver leur emploi sur des embarcations. Les manivelles y ont le même angle de calage, mais les temps du cycle sont alternés de telle façon que, pendant l'aspiration dans l'un des cylindres, l'explosion se produise dans l'autre. Une manivelle, agissant sur l'arbre de couche par l'intermédiaire d'un renvoi à engrenage et chaîne Galle, sert à la mise en train.

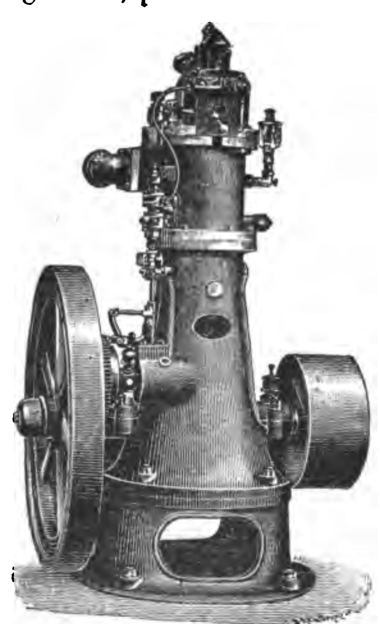


Fig. 29. — Moteur ordinaire à pétrole Grob.

Moteurs a gaz ou a pétrole. — Après avoir ouvert

l'admission de gaz ou de pétrole, on allume la lampe qui doit provoquer la déflagration du mélange d'hydrocarbure et d'air.

On met le volant en mouvement de façon à lui faire faire plusieurs tours après quoi le moteur doit partir tout seul.

On règle l'admission de gaz ou de pétrole de façon à ne fournir au moteur que la quantité de gaz actifs nécessaire.

Les précautions pour le graissage sont les mêmes que pour les machines à vapeur.

On arrête les moteurs de cette catégorie en fermant l'admission de gaz ou de pétrole.

Turbines.

Les turbines sont des moteurs hydrauliques à axe horizontal ou vertical, dans lesquels le mouvement de l'eau se fait sans changer de sens. Elles utilisent la puissance de chute sous forme de force vive, par pression et non par choc.

De tous les récepteurs hydrauliques, elles sont à peu près seules utilisées à la conduite des dynamos : les roues tournent en effet trop lentement, ce qui oblige à multiplier les transmissions de mouvement, et leur rendement est en conséquence bien inférieur à celui des turbines.

La turbine comprend deux parties essentielles : un *distributeur* fixe et le *récepteur* mobile.

Le distributeur reçoit l'eau, la subdivise en filets, et le récepteur transforme la force vive des filets et la transmet à l'arbre moteur.

Les turbines se subdivisent en plusieurs classes :

Turbines radiales, dans lesquelles l'eau agit en res-

tant dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation ; ce sont les turbines centrifuges et les turbines centripètes.

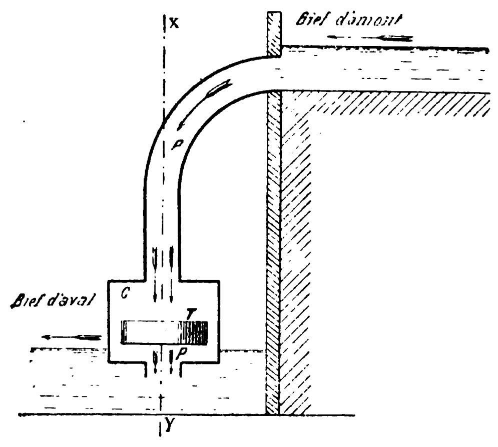


Fig. 30. — Dispositions relatives d'une turbine et des deux biefs.

Turbines axiales, dans lesquelles l'eau agit en restant sur un cylindre ayant comme axe de figure celui de la turbine, comme c'est le cas dans les turbines parallèles.

Il existe en outre une autre série de turbines dans lesquelles l'eau agit dans des directions différentes de celles qui viennent d'être indiquées.

Chacune de ces classes peut être divisée en deux autres suivant que l'axe est horizontal ou vertical.

En principe, l'eau est amenée à la turbine par une conduite ; reçue par le distributeur dont la disposition varie avec le genre de la turbine, l'eau vient en filets frapper les aubes du récepteur qui prennent un mouvement de rotation transmis à l'arbre moteur sur lequel la dynamo est montée.

Vannage. — On a souvent intérêt à faire développer à la turbine une puissance en rapport avec le travail à fournir, et, pour réaliser cette condition, on obture plus ou moins, par des dispositifs variables d'un constructeur à l'autre, la section des ouvertures des distributeurs, et par suite la quantité d'eau qui actionne le récepteur. On peut agir soit sur toutes les ouvertures du distributeur, soit seulement sur une partie d'entre elles ; cette dernière disposition est la plus employée.

Les turbines centripètes sont moins sujettes que les turbines centrifuges à des variations de vitesse quand la résistance à vaincre varie : elles doivent en général leur être préférées.

Turbines centripètes à axe vertical. — L'installation générale est la même que celle de la turbine centrifuge, avec cette différence toutefois, que le récepteur est à l'intérieur du distributeur.

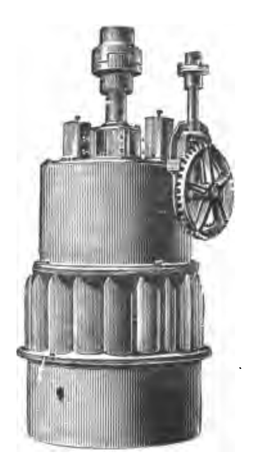


Fig. 31. — Turbine centripète à axe vertical.

Le distributeur est séparé de l'eau d'amont par un couvercle qui force l'eau à se diriger vers le bief d'aval.

La réaction de l'eau renfermée dans la turbine sur la colonne d'eau, venant de la chute, régularise la vitesse de rotation et tend à contrebalancer l'influence des variations de charge.

Les turbines de classe sont préférées pour la conduite des dynamos.

Turbines centripètes à axe horizontal. — Ce type est très répandu en Amérique, et son alimentation se fait

soit par tout le pourtour, soit sur une partie seulement de la surface du récepteur. Il est établi pour travailler hors de l'eau.

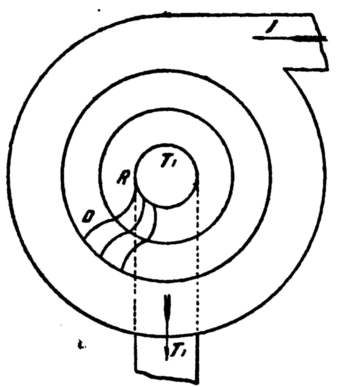


Fig. 32 — Turbine centripète à axe horizontal.

T est le tuyau d'arrivée de l'eau et T_1 le tuyau de sortie.

Le distributeur est en D et le récepteur en R.

Turbines centrifuges à axe vertical. — Le distributeur D est fixe et monté sur un axe creux A qui lui amène l'eau, et celle-ci sort par des ouvertures munies d'aubes directrices réparties sur sa surface verticale.

Le récepteur R est mobile : il a la forme d'une couronne concentrique et extérieure au récepteur. Les deux surfaces cylindriques sont réunies par des aubes que l'eau frappe et suit avant de s'échapper au dehors.

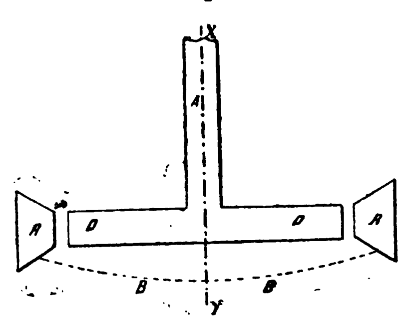


Fig. 33. — Turbine centrifuge à axe vertical.

Le récepteur est monté sur l'axe de rotation XY par des bras B. B.

Turbines centrifuges à axe horizontal. — Leur disposition générale est la même que celles des turbines à axe vertical ; mais elles

sont établies pour travailler hors de l'eau qui leur est amenée par un tube métallique.

Turbines axiales ou *parallèles*. — Le distributeur D et le récepteur R forment deux couronnes à aubes superposées. Le premier est fixe et le deuxième mobile, et leur ensemble constitue le fond de la chambre à eau par lequel le liquide s'écoulera dans le bief d'aval.

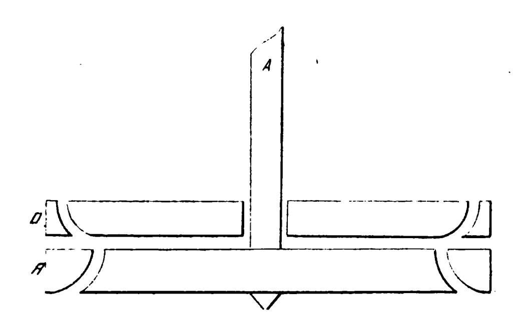


Fig. 34. — Turbine parallèle à axe vertical.

La Fig. 34 ci-dessus montre la coupe d'une de ces turbines par un plan vertical passant par l'axe.

Rendement. — La puissance, évaluée en kilogrammètres par seconde, d'une chute de h mètres débitant V litres à la seconde est :

$$P \text{ kgm : s} = hV.$$

Pratiquement on ne recueille sur l'arbre moteur que 65 à 80 pour cent de cette puissance, parce que l'eau sort de la turbine encore animée d'une certaine vitesse et qu'il se produit des frottements dans l'intérieur de la turbine.

Ainsi, une chute débitant 1 200 litres à la seconde

sous une hauteur de chute de 20 mètres développera une puissance de :

$$1\,200 \times 20 = 24\,000 \text{ kilogrammètres par seconde.}$$

Son utilisation par une turbine à grande vitesse angulaire donnera (pour $\eta = 70\ \%$) une puissance disponible de :

$$\frac{24\,000 \times 70}{100} = 16\,800 \text{ kilogrammètres par seconde,}$$

soit 222 chevaux.

Une turbine à faible vitesse angulaire, dont le rendement eût été de 75 %, aurait donné disponibles :

$$\frac{24\,000 \times 75}{100} = 18\,000 \text{ kilogrammètres par seconde,}$$

soit 240 chevaux.

Fonctionnement. — Il n'y a pas de règle fixe pour la mise en route et l'arrêt des turbines, en raison de la diversité de leur construction.

L'admission de l'eau ou son arrêt entraine la mise en marche ou l'arrêt de la turbine ; on agira donc sur le *vannage* ou sur les vannes du canal d'amenée.

On règlera la vitesse de rotation de la même manière.

Les paliers doivent être soigneusement graissés et l'on veillera à ce que des cailloux, morceaux de bois, etc., ne s'introduisent pas dans les aubes.

Conditions à remplir par le Moteur.

A quelque catégorie qu'il appartienne, le moteur doit réunir les qualités suivantes :

Vitesse angulaire uniforme ;

Grande sensibilité du régulateur au moment des variations de charge ;

Volant massif tournant rond.

Les deux premières conditions permettront de donner à la dynamo une vitesse angulaire uniforme, même au moment de l'allumage ou de l'extinction de groupes de lampes. Cette condition est indispensable pour assurer la fixité de la lumière.

Le volant doit posséder un poids en rapport avec la vitesse de rotation et la puissance de la dynamo pour faire franchir sans arrêt le point mort, sans quoi l'éclat des lampes à incandescence varierait.

Le volant doit naturellement tourner rond ; si cette condition n'est pas remplie, la vitesse de rotation de la dynamo variera au moins une fois à chaque tour, et avec elle l'éclat des lampes.

Transmissions.

La puissance du moteur peut être transmise à la poulie de la dynamo soit par accouplement direct des deux arbres, si la vitesse de rotation des deux machines est la même ; soit, dans le cas contraire, par l'intermédiaire d'une courroie ou de câbles.

La commande par courroie est la plus usitée parce qu'elle ne nécessite pas d'organes de transmission spéciaux et qu'elle est d'un bon service. Il faut veiller à ce que sa tension soit bien maintenue, sans quoi il se produirait des variations de vitesse et, par suite, de force électromotrice.

La commande par câbles nécessite des poulies rainées ; en outre, les câbles vibrent, frottent les uns sur les autres et s'usent assez rapidement.

L'accouplement direct des deux machines, réalisable quand les vitesses sont les mêmes, peut être obtenu par l'emploi des dispositifs suivants.

Accouplement Raffard. — Les arbres des deux machines, placés dans le prolongement l'un de l'autre, portent chacun un plateau de bronze. Ces deux plateaux sont réunis entre eux par des bandes de caoutchouc.

L'entraînement se fait sans à-coup.

Embrayage Snyers. — Les deux plateaux qui terminent les arbres sont plantés de fils d'acier, comme le serait une brosse circulaire. Les fils des deux plateaux pénètrent les uns dans les autres et leur adhérence assure l'entraînement de la dynamo d'une façon progressive.



Fig. 35. — Embrayage Snyers.

Les moteurs à gaz dont la vitesse n'est pas uniforme doivent-ils ou non être munis d'une transmission élastique ? — On croyait qu'à l'aide de cet artifice on atténuerait les irrégularités de vitesse ; M. Picou prétend que non, et, de fait, il est très difficile de régulariser complètement la vitesse d'une dynamo commandée par un de ces moteurs.

On sait en effet que l'irrégularité de vitesse du moteur à gaz provient de ce que l'explosion détermine d'abord une augmentation de pression suivie d'une détente qui correspond au développement du travail utile. C'est le premier temps du moteur. Les deux temps suivants ont un effet nul, et la quatrième période de compression donne lieu à une absorption de travail.

Voici les conclusions d'un travail fort intéressant de M. Picou sur ce sujet :

Transmission élastique. — On a essayé de rendre régulière la marche de la dynamo en la reliant à l'arbre de commande du moteur par une transmission élastique, celle de M. Raffard, par exemple.

Il résulte du calcul, dit l'auteur, que, de quelque manière que l'on combine les choses, la perturbation sur la dynamo est plus grande avec une liaison élastique qu'en l'absence de ladite liaison.

Cette conséquence s'applique également à la courroie de transmission, qui doit être aussi peu élastique que possible.

Inertie du volant. — L'augmentation de l'inertie du volant serait le moyen le plus sûr, à la condition de la limiter cependant au poids maximum du volant que peut supporter l'arbre de transmission du moteur à gaz. Enfin, des considérations diverses peuvent aussi venir limiter les dimensions et la vitesse des volants.

Volant à la dynamo. — L'adjonction d'un volant à la dynamo ne produit qu'un effet utile insignifiant.

Son utilité ne se manifeste que si le joint de la courroie de transmission est très saillant et produit à chacun de ses passages une accélération de la vitesse. Mais il faut que la courroie soit longue, large et peu tendue.

Moyens divers. — Le volant à inertie variable de M. Raffard est formé d'un volant évidé portant des masses métalliques qui peuvent se déplacer radialement, sous l'influence de la force centrifuge, et comprimer des ressorts antagonistes.

L'emploi de ce système est encore trop peu répandu pour que l'on puisse formuler à son égard une appréciation rationnelle. Tout ce que l'on peut dire, c'est que le système Raffard permettrait d'emmagasiner une

quantité de travail beaucoup plus grande qu'un simple volant.

M. Picou étudierait un système de régularisation consistant à emmagasiner par un ressort une partie du travail développé par la course-avant du piston.

CHAPITRE II

THÉORIE GÉNÉRALE DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES

Introduction.

L'étude des phénomènes produits par le passage du courant électrique dans un conducteur, aussi bien que l'historique des découvertes qui ont amené cette science au degré de perfection relative qu'elle a acquis aujourd'hui, sortent du cadre de cet ouvrage qui a pour but spécial les applications de l'énergie électrique à la production de la lumière et à l'utilisation rationnelle de cette dernière.

Nous prierons ceux de nos lecteurs qui désirent faire une étude plus approfondie soit des lois de l'électricité en elles-mêmes, soit des générateurs ou transformateurs instantanés ou différés de l'énergie électrique, de se reporter pour la première partie au *Manuel d'électricité industrielle* de Tainturier et pour les autres aux traités spéciaux qui font partie de la *Collection Electrotechnique*.

Néanmoins, pour faciliter l'intelligence des méthodes de distribution et de conduite d'une station d'éclairage électrique, nous résumerons brièvement les lois fondamentales de la production et de la propagation du courant dans les conducteurs, et nous rappellerons les formules indispensables à connaître pour la conduite des dynamos, mais sans en donner la démonstration.

Aussi bien pour la figuration des symboles que pour l'expression de leur valeur, nous adopterons la notation de M. Hospitalier, si précise et si correcte, et nous aurons soin de faire suivre l'exposition de chaque formule d'un exemple numérique, sauf pour les cas où cette application du calcul ne présenterait qu'un intérêt secondaire.

Unités Pratiques.

(SYSTÈME ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE C. G. S.)

UNITÉ DE LONGUEUR. — C'est le *centimètre*, unité C. G. S.

UNITÉ DE SURFACE. — Le *centimètre carré*, unité C. G. S.

UNITÉ DE VOLUME. — Le *centimètre cube*, unité C. G. S.

UNITÉ DE VITESSE. — Le *centimètre par seconde*, unité C. G. S.

UNITÉ DE VITESSE ANGULAIRE. — Désignée sous le nom de *radian*, le radian étant l'arc de longueur égale au rayon : $57^{\circ}\ 17'\ 44''$. On la désigne par le symbole ω.

Si n représente un nombre de tours effectué en t secondes, la vitesse angulaire évaluée en *radians* est :

$$\omega = \frac{2\pi n}{t}.$$

UNITÉ DE MASSE. — C'est le *gramme-masse*, unité C. G. S.

UNITÉ DE FORCE. — Le *gramme poids*, valant 981 *dynes* (unité C. G. S.).

UNITÉ DE PRESSION. — Le *gramme par cm²* équivalant à la pression de 981 dynes par cm² (unité C. G. S).

UNITÉ D'INTENSITÉ. — Elle porte le nom d'*ampère* et vaut 10^{-1} unité C. G. S.

UNITÉ DE QUANTITÉ. — Désignée sous le nom de *coulomb*, elle vaut 10^{-1} unité C. G. S. et correspond au dégagement de 10,38 microgrammes d'hydrogène dans l'électrolyse de l'eau, le volume de gaz étant mesuré à 0°C et sous la pression de 760 millimètres.

Ampère-heure. — C'est la quantité d'électricité qui traverse un circuit pendant 1 heure quand l'intensité est de 1 ampère

1 ampère-heure = 3 600 coulombs.

UNITÉ DE FORCE ÉLECTROMOTRICE ET DE DIFFÉRENCE DE POTENTIEL. — Sa dénomination est le *volt* et elle vaut 10^8 unités C. G. S.

UNITÉ DE RÉSISTANCE. — On la désigne sous le nom d'*ohm* ; elle vaut 10^9 unités C. G. S.

Un kilomètre de fil de cuivre de 4,5 millimètres de diamètre, soit de 15,908 millimètres carrés de section, présente une résistance de 1 ohm.

UNITÉ DE CAPACITÉ. — Cette unité a reçu le nom de *farad*, qui vaut 10^{-9} unité C. G. S.

UNITÉ DE TRAVAIL. — L'unité C. G. S. de travail est le travail produit par une force de 1 dyne agissant sur une longueur de 1 centimètre. On l'appelle *erg*.

Ses unités pratiques sont :

le gramme-centimètre	égal à	981 ergs
le kilogrammètre	—	98,1 mégergs
le cheval-heure	—	270 000 kilogrammètres

UNITÉ DE PUISSANCE. — Désignée sous le nom de *poncelet*, elle vaut 100 kilogrammètres par seconde et

est appelée à remplacer le *cheval-vapeur* encore conservé dans l'industrie comme unité pratique de puissance.

1 cheval-vapeur	égale	75 kilogrammètres par seconde
1 —	—	7 378 még-ergs par seconde.
1 —	—	0,75 poncelet
1 poncelet	—	1,33 cheval-vapeur.

En électricité on emploie plus couramment le *watt*, produit d'un ampère par un volt, ou ses multiples, qui sont liés aux unités ci-dessus par les relations suivantes :

1 watt	égale	$\frac{1}{736}$ cheval-vapeur
1 kilowatt	—	1,33 cheval-vapeur
—	—	1,0193 poncelet
1 poncelet	—	0,981 kilowatt.

INTENSITÉ LUMINEUSE. — Quantité fondamentale : intensité, mesurée suivant la normale, d'une source lumineuse constituée par 1 cm^2 de platine au moment de sa solidification (Etalon Violle).

Unité pratique : la *bougie décimale* ou *pyr* $= \frac{1}{20}$ de la précédente.

FLUX LUMINEUX. — Produit d'une intensité lumineuse par un angle solide. Unité pratique : Flux produit par 1 pyr dans un angle solide égal à 1 stéradian. Nom : *Lumen*.

Un foyer ponctuel d'intensité lumineuse égale à 1 pyr dans toutes les directions produit un flux lumineux de 4π lumens.

ÉCLAIREMENT. — Quotient du flux lumineux par la surface sur laquelle il tombe normalement.

Unité pratique : éclairement produit par un foyer

d'intensité lumineuse égale à 1 pyr tombant sur une surface plane placée normalement à 1 mètre de distance. C'est la *bougie à 1 mètre* ou *lux.*

ECLAT INTRINSÈQUE. — Quotient de l'intensité lumineuse d'une source, émise normalement, par la surface de cette source. Unité pratique : *Pyr par centimètre carré.* L'étalon Violle vaut 20 pyrs par cm^2.

ILLUMINATION. — Produit d'un éclairement par un temps.

Unité pratique : *Phot* ou *lux par seconde.*

QUANTITÉ DE LUMIÈRE OU ECLAIRAGE. — Produit d'un flux de lumière et d'un temps, ou d'un éclairement, d'une surface et d'un temps. Unité pratique : *Lumen-seconde* ou *Rad.*

Industriellement on emploie le *lumen-heure.*

Magnétisme.

CORPS MAGNÉTIQUES. — On classe dans cette catégorie les corps qui se comportent comme le fer dans un champ magnétique, c'est-à-dire qui tendent à s'orienter parallèlement aux lignes de force du champ.

CORPS DIAMAGNÉTIQUES. — Cette deuxième catégorie comprend les corps qui, comme le bismuth, tendent à s'orienter perpendiculairement à la direction des lignes de force.

AIMANTS. — Les aimants sont des corps qui possèdent la propriété d'attirer la limaille de fer. L'acier trempé est celui qui en jouit au plus haut degré.

PÔLES MAGNÉTIQUES. — Cette propriété caractéristique des aimants est concentrée vers les deux extrémités du barreau qui portent le nom de *pôles.*

L'action du globe terrestre fait prendre à un aimant libre la direction Nord-Sud, et l'on désigne sous le nom de *pôle Nord* ou N et de *pôle Sud* ou S, les pôles qui, par suite de cette orientation, se dirigent vers le pôle Nord ou le pôle Sud du globe.

Actions magnétiques. — Deux pôles de noms contraires s'attirent, et deux pôles de même nom se repoussent.

La force magnétique qui agit décroît, toutes autres conditions égales, en raison inverse du carré de la distance des pôles magnétiques agissants, et son action peut être représentée par la formule

$$f = k \frac{m \cdot m'}{d}.$$

m et m' sont les *quantités de magnétisme* ou *masses des pôles* en présence, et d leur distance.

Unité de pôle. — C'est le pôle qui, placé en regard d'un autre pôle identique, à la distance de 1 centimètre, exerce sur le second une action répulsive égale à une dyne.

D'après cette définition, on voit que, dans le système magnétique C. G. S., on fait $k = 1$ dans la formule précédente.

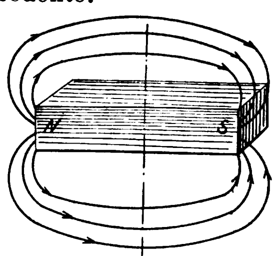


Fig. 36. — Aimant et son champ magnétique.

Champ magnétique. — La partie de l'espace dans laquelle se manifeste l'existence de forces magnétiques constitue le *champ magnétique*.

Le champ est caractérisé par la présence de *lignes de force* (Fig. 36), et son *intensité* est mesurée par le nombre de ces lignes par centimètre carré de surface.

Cette intensité peut être aussi déterminée par l'expression :

$$\mathcal{H} = \frac{f}{m}.$$

Unité d'intensité de champ magnétique. — Si la force qui agit sur une unité de pôle est égale à une dyne, l'*intensité du champ* est égale à une unité C. G. S.

Les champs magnétiques les plus intenses que l'on produise sont d'environ 30 000 unités C.G.S. ; ils développent sur une *unité de pôle* une force de 3 kg.

Flux de force. — Le flux de force dans une surface S est le produit de cette surface par l'intensité $\mathcal{H}$ du champ.

$$\Phi = \mathcal{H} \, . \, S.$$

Un flux de force est égal à une unité quand il est produit par un champ magnétique de 1 unité dans une surface de 1 centimètre carré.

Induction. — Lorsqu'un flux Φ traverse une surface S, l'*induction* est définie par le quotient :

$$\mathcal{B} = \frac{\Phi}{S}.$$

L'unité d'induction correspond à la présence de 1 ligne de force par centimètre carré.

Longueur vraie d'un aimant. — On désigne ainsi la distance des deux pôles P et P′ d'un aimant ; ceux-ci, on le sait, ne se trouvent point exactement aux extrémités du barreau. On la désigne par l, comme toute longueur.

Moment magnétique d'un barreau. — Le produit de la *quantité* ou *masse de magnétisme* par la longueur vraie d'un aimant représente son moment magnétique ;

$$\mathcal{M} = l \, . \, m.$$

Intensité d'aimantation. — Le quotient du moment

magnétique d'un aimant par son volume V, figure son intensité d'aimantation :

$$\mathfrak{I} = \frac{\mathcal{M}}{V}.$$

Densité de pôle. — Dans un aimant élémentaire supposé cylindrique, dont les pôles sont concentrés sur les bases, cette *densité* σ est représentée par le quotient de la masse magnétique par la surface de la base :

$$\sigma = \frac{m}{s} = \frac{ml}{ls} = \frac{\mathcal{M}}{V}.$$

On voit ainsi que la *densité de pôle* et l'intensité d'aimantation ont même expression numérique.

Puissance d'un feuillet magnétique. — Si l'on considère un feuillet magnétique de longueur l et de densité σ, le produit de ces deux quantités donnera la *puissance* du feuillet

$$\mathfrak{P} = l \cdot \sigma.$$

Magnétisme spécifique. — Le magnétisme spécifique d'un barreau est le quotient de son moment magnétique par sa masse :

$$\frac{\mathcal{M}}{m}.$$

Loi. — L'énergie relative W d'un feuillet magnétique dans un champ est égale au produit, pris en signe contraire, de la puissance $\mathfrak{P}$ du feuillet par le flux Φ limité à son contour et pénétrant par la face négative ;

$$W = \mp \Phi\mathfrak{P}.$$

Coefficient d'induction mutuelle de deux feuillets magnétiques. — Soient $\mathfrak{P}$ et $\mathfrak{P}'$ les puissances des feuillets ; ce coefficient sera égal à :

$$\frac{\Phi}{\mathfrak{P}} \quad \text{et aussi à} \quad \frac{\Phi'}{\mathfrak{P}'}$$

Susceptibilité magnétique. — On désigne ainsi le rapport entre l'intensité d'aimantation obtenue et l'intensité du champ magnétique agissant :

$$\varkappa = \frac{\mathfrak{J}}{\mathcal{H}}.$$

Perméabilité magnétique. — C'est le rapport de l'induction à l'intensité du champ magnétique :

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}.$$

Notons en passant les deux relations suivantes :

$$\mathcal{B} = \mathcal{H} + 4\pi\mathfrak{J} = \mathcal{H}\,(1 + 4\pi\varkappa)$$
$$\mu = 1 + 4\pi\varkappa.$$

Propriétés magnétiques de la fonte et du fer. — Le tableau ci-dessous indique les valeurs de $\mathcal{B}$ et de μ en fonction de $\mathcal{H}$, déterminées par Hopkinson :

Fer forgé recuit			Fonte grise		
$\mathcal{H}$	$\mathcal{B}$	μ	$\mathcal{H}$	$\mathcal{B}$	μ
2	5 000	2 500	5	4 000	800
4	9 000	2 250	10	5 000	500
5	10 000	2 000	21,5	6 000	279
6,5	11 000	1 692	42	7 000	166
8,5	12 000	1 412	80	8 000	100
12	13 000	1 083	127	9 000	71
17	14 000	823	188	10 000	53
28,5	15 000	526	292	11 000	37
52	16 000	308			
105	17 000	161			
200	18 000	90			
350	19 000	54			

On voit que, à intensité de champ égale, le fer possède une induction de beaucoup supérieure à celle de la fonte.

Pour des valeurs de $\mathcal{B}$ inférieures à 10 000 unités C. G. S., on a approximativement :

$$\mu = 5{,}6\ \mathcal{B}^{\frac{2}{3}}.$$

ÉTUDE DU FER DOUX. — Voici, d'après Shelford Bidwell, les résultats donnés par anneau de fer doux divisé en deux parties :

$\mathcal{H}$	Force portante en gr par cm²	$\mathcal{J}$	$\varkappa$	μ	$\mathcal{B}$
3,9	2 210	587	151	1 899,1	7 390
5,7	3 460	735	128,9	1 621,3	9 240
10,3	5 400	918	89,1	1 121,4	11 550
17.7	7 5[illegible]0	1 083	61,2	770,2	13 630
22.2	8 440	1 147	51,7	650,9	14 450
30,2	5 215	1 197	39,7	500	15 100
40	9 680	1 226	30,7	386,4	15 460
78	11 550	1 337	17,1	116.5	16 880
115	12 170	1 370	11.9	150.7	17 330
145	12 800	1 403	9,7	122,6	17 770
208	13 810	1 452	7	88,8	18 470
293	14 350	1 474	5	64,2	18 820
362	14 740	1 489	4,1	52,7	19 080
427	15 130	1 504	3,5	45.3	19 330
465	15 275	1 508	3,2	41,8	19 470
503	15 365	1 510	3	38,7	19 480
557	15 600	1 517	2,7	35.2	19 630
585	15 905	1 530	2,6	33,9	19 820

RÉSISTANCE MAGNÉTIQUE SPÉCIFIQUE OU RÉLUCTIVITÉ. — La résistance magnétique spécifique d'une substance est l'inverse de sa perméabilité :

$$\nu = \frac{1}{\mu}.$$

La résistance magnétique spécifique de l'air est constante et prise pour *unité*.

Circuit magnétique. — Dans tout circuit magnétique les lignes de force tendent à se raccourcir.

Les lignes de force de même sens se repoussent et celles de sens contraires s'attirent.

Résistance magnétique ou réluctance d'un circuit. — Elle est proportionnelle à sa longueur, à sa réluctivité et en raison inverse de sa section :

$$\mathcal{R} = \nu \frac{l}{s} = \frac{l}{\mu s}.$$

Saturation magnétique. — Lorsqu'on soumet un barreau de fer doux à l'état naturel à l'action d'un champ magnétique d'intensité croissante, on remarque que l'intensité d'aimantation du barreau croît avec celle du champ, puis prend une valeur à peu près constante quelle que soit l'augmentation de l'intensité du champ.

On dit alors que le barreau est *saturé*.

L'intensité d'aimantation du fer correspondant à la saturation est d'environ 1700 unités C. G. S. ; elle est respectivement de 1240 et de 515 unités C. G. S. pour la fonte et le nickel.

Voici, d'après Ewing et Lowe, les variations de $\mathcal{B}$ en fonction de $\mathcal{H}$ lorsque l'intensité d'aimantation tend vers la limite correspondant à la saturation magnétique :

$\mathcal{H}$	Fer de Lowmoor $\mathcal{B}$	Fer de Suède $\mathcal{B}$	Fonte $\mathcal{B}$
3 630	22 400	»	19 600
11 000	32 000	33 330	25 600
16 900	»	»	31 270
18 900	38 000	37 600	»
»	45 350	»	»

Hystérésis. — Si l'on soumet un barreau de fer doux à l'action d'un champ magnétique dont la valeur varie de 0 à $+\mathcal{H}$ et de $+\mathcal{H}$ à $-\mathcal{H}$, on constate que l'intensité d'aimantation (ou l'induction) n'affecte pas la même valeur pendant la première partie de la variation de $\mathcal{H}$ que pendant la seconde, et ce pour une même valeur donnée de $\mathcal{H}$.

L'intensité d'aimantation est toujours plus faible quand $\mathcal{H}$ augmente que quand il diminue ; la différence de ces deux valeurs de $\mathfrak{J}$ (ou de $\mathfrak{B}$) représente le *magnétisme résiduel.*

L'intensité d'aimantation d'un barreau dépend donc, toutes autres conditions égales, des états magnétiques antérieurs.

Ce phénomène résulte des frottements qui s'opposent au déplacement des molécules ; il se manifeste par un échauffement du barreau.

Perte par hystérésis. — C'est l'énergie dépensée sous forme de chaleur pendant la production de l'aimantation.

Pour un champ dont l'intensité varie entre des valeurs positives et négatives égales à 240 unités C. G. S., la perte pour le fer varie par cycle de 10 000 à 15 000 ergs par centimètre cube. L'acier doux donne des résultats analogues.

La perte de l'acier au tungstène s'élève à 216 000 ergs par centimètre cube.

Calcul de l'énergie dissipée par hystérésis. — La formule de Steinmetz

$$\frac{W}{V} = \eta \mathfrak{B}_{max}^{1,6}$$

donne, en ergs par centimètre cube de métal, la perte d'énergie due à l'hystérésis.

Voici les valeurs de μ pour les métaux les plus usuels :

Fer très doux	0,002
Tôle de fer douce et mince	0,0024
Bonne tôle mince	0,003
Tôle courante	0,0033
Acier doux fondu et recuit	0,004 à 0,005
Acier doux pour machines	0,008
Acier fondu	0,012
Fonte	0,0162
Acier fondu trempé	0,025

DONNÉES COMPLÉMENTAIRES POUR LE FER DOUX

Valeurs de $\mathcal{B}_{max}$	Valeurs de $\mathcal{B}_{max}^{1,6}$	Valeurs de : $\eta\,\mathcal{B}_{max}^{1,6}$ pour			
		$\eta = 0,002$	$\eta = 0,003$	$\eta = 0,004$	$\eta = 0,005$
1 000	63 100	126	189	252	316
2 000	191 300	383	574	765	947
3 000	365 900	732	1 097	1 464	1 830
4 000	580 000	1 160	1 740	2 320	2 900
5 000	828 000	1 658	2 486	3 315	4 144
6 000	1 111 000	2 222	3 333	4 444	5 555
7 000	1 420 000	2 840	4 260	5 680	7 100
8 000	1 758 000	3 516	5 274	7 032	8 790
9 000	2 122 000	4 244	6 366	4 488	10 610
10 000	2 511 000	5 022	7 533	10 044	12 555

Propagation du courant électrique. Loi d'Ohm.

La circulation d'un courant électrique dans un conducteur et, par suite, sa production sont décelables par l'apparition de phénomènes que l'on peut, au besoin, provoquer. Sans vouloir discuter l'origine et le mode

de propagation de ce courant, nous admettrons que tout courant électrique qui est constaté dans un conducteur est la conséquence de la production d'une *force électromotrice.*

Enfin nous admettrons aussi que cette force électromotrice se traduit par l'établissement d'une *différence de potentiel* entre deux points quelconques du circuit.

Il en résultera donc que le courant ne peut suivre un conducteur entre deux de ses points qu'autant qu'il existe entre eux une différence de potentiel.

Réciproquement, si un courant circule entre deux points d'un conducteur, il existe entre eux une différence de potentiel.

Pour aider à l'intelligence des définitions, plutôt que de ces phénomènes eux-mêmes, on assimile volontiers un courant électrique, soit à un courant d'eau, soit à un transport de chaleur.

Dans le cas d'un courant d'eau, on suppose deux vases A et B réunis par une conduite ACDEB et dans lesquels le niveau de l'eau est à une hauteur différente au-dessus du point le plus bas de la conduite pris comme zéro.

D'après le principe des vases communiquants, l'eau s'écoulera du vase A vers le vase B, parce que le niveau *aa* est à une hauteur h, au dessus du point le plus bas D de la conduite, plus grande que la hauteur h' du niveau *bb* au dessus du point D. On dit que l'écoulement de l'eau est due à la différence $h - h'$ des niveaux *aa* et *bb* ; et par analogie, si $V - V'$ représente la différence des potentiels entre deux points A et B d'un conducteur, avec $V - V' > 0$, on dit que la production du courant est due à une différence de *niveau* ou de *potentiel électrique.*

On conçoit en outre que, si la conduite ACDEB est plus ou moins sinueuse, l'écoulement de l'eau s'opèrera plus ou moins difficilement, en raison des frottements contre les parois ; à forme sinueuse identique, plus la section du tube sera grande, toutes autres conditions égales, et plus l'écoulement se fera facilement.

Il en est de même dans le cas du courant électrique, car l'expérience démontre que, de deux fils de même matière et d'égale longueur, celui qui a la section la plus large oppose le moins de résistance au passage du courant, cette diminution de résistance se manifestant par un accroissement d'intensité du phénomène révélateur du passage du courant.

Dans l'étude de la circulation d'un courant dans un conducteur déterminé nous aurons donc à considérer :

La différence $V - V' = U$ de potentiel entre les extrémités du conducteur, en vertu de laquelle se manifeste la *force électromotrice* ;

La nature et les dimensions géométriques du conducteur qui déterminent la *résistance* R opposée au passage du courant ;

L'*intensité* I du courant, c'est-à-dire la quantité d'électricité qui passe, dans un temps donné, par la section du conducteur ;

Et, dans certains cas, la *capacité électrique* C de ce conducteur, dont l'intervention produit des phénomènes importants à considérer, notamment dans les canalisations souterraines.

Toutes ces quantités sont reliées entre elles par des formules assez simples.

Si l'on fait abstraction de la capacité et d'une autre propriété appelée *self-induction* d'un conducteur A B

entre les extrémités duquel existe une différence de potentiel $V - V'$ l'intensité du courant constant qui y circule peut être exprimée par l'application de la loi d'Ohm.

Loi d'Ohm. — **L'intensité d'un courant est proportionnelle à la force électromotrice qui le produit et inversement proportionnelle à la résistance du conducteur.**

On aura donc :

$$I = \frac{V - V'}{R} = \frac{U}{R} = \frac{E}{R}.$$

La quantité R dépend de la nature et des dimensions géométriques du conducteur, et, si l'on suppose que ce dernier est constitué par un cylindre parfait, on pourra poser :

$$R = \frac{l}{\gamma s},$$

en représentant par l et s sa longueur et sa section et par γ l'influence de sa nature, sa *conductivité* ; par suite

$$I = \frac{E}{\frac{l}{\gamma s}}.$$

L'expérience a prouvé que deux conducteurs de longueur et de section égales présentent des résistances différentes, s'ils sont constitués par des corps différents.

Résistance spécifique ou *Résistivité*. — On est convenu d'appeler ainsi le rapport $\frac{1}{\gamma}$ variable d'un corps à l'autre. On le désigne par ρ, et, la *résistance* d'un corps s'évaluant en *ohms*, sa *résistivité* ρ s'exprime en *ohms* ou *microhms-centimètre*. Pour les corps conducteurs elle augmente avec la température.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des résistances des principaux métaux et alliages.

RÉSISTIVITÉ ET RÉSISTANCE DES MÉTAUX ET DES ALLIAGES USUELS

Nature des conducteurs	Résistance spécifique en microhms-centimètre	Résistance de un mètre pesant 1 gramme	Résistance de 100 m de 1 millimètre de diamètre	Accroissement de résistivité par degré vers 20°C
		ohms	ohms	
Argent recuit	1,492	0,1517	1,899	0.00377
— écroui	1,620	0,1650	2,062	0,00385
Cuivre recuit	1,584	0,1415	2,017	0,00388
— écroui	1,621	0,1443	2,063	0,00410
Or recuit	2,041	0,4007	2,598	0,00365
Or écroui	2,077	0,4076	2,645	»
Aluminium	2,889	0,0743	3,679	0,0039
Zinc comprimé	5,580	0,3995	7,105	0,00365
Platine recuit	8,981	1,9250	11,435	0,00247
Fer recuit	9,636	0,7518	12,270	0,0050
Nickel recuit	12,356	1,0520	15,730	0,0050
Ferro-nickel	78,300	1,0140	29,694	0,00093
Etain comprimé	13,103	0,9564	16,680	0,00365
Plomb comprimé	19 465	2,2170	24,780	0,00387
Antimoine comprimé	35,210	2,3700	44,830	0,00389
Bismuth comprimé	130,100	12,8000	165,600	0,00354
Mercure liquide	94,340	12,8260	120 120	0,00072
Alliage 2Pt + 1Ag	24,187	2,9070	30,780	0,00031
— 2Au + 1Ag	10,776	1 6380	17,720	0,00065
— 9Pt + 1Ir	21,633	4,6510	27,540	0,00133
Maillechort	20,760	1,8170	26,43	0,00044

Perte de charge. — La formule représentative de la loi d'Ohm :

$$I = \frac{V - V'}{R} = \frac{U}{R} = \frac{E}{R}$$

appliquée à l'une des parties d'un circuit de résistance R, montre que la différence de potentiel

$$V - V' = U$$

entre les extrémités de ce conducteur dépend de l'intensité du courant qui y circule.

Par suite, on pourra évaluer la différence de potentiel entre deux points quelconques d'un circuit si l'on connaît l'intensité du courant et la résistance du conducteur qui relie ces points à la source de force électromotrice. Cette connaissance est indispensable pour la répartition des lampes ou autres récepteurs.

On voit, d'autre part, que la perte en *volts*, dite *perte de charge*, est proportionnelle, toutes autres conditions égales, à la résistance du conducteur en *ohms* et à l'intensité du courant en *ampères*.

Par le choix judicieux de cette résistance, on pourra maintenir, en un point quelconque d'un réseau, la tension correspondant au bon fonctionnement des appareils récepteurs.

En résumé, la *perte de charge* dans un conducteur de résistance R est :

$$U = R.\ I.$$

Elle est proportionnelle à la résistance du conducteur et à l'intensité du courant qui y circule.

APPLICATION AU CALCUL DES ÉLÉMENTS D'UN CONDUCTEUR

Dans les formules suivantes qui donnent l'expression d'un des éléments d'un conducteur en fonction des autres, nous désignerons par :

ρ la résistance spécifique du conducteur en ohms-centimètre

D sa densité

M sa masse en grammes

d son diamètre en centimètres

l	sa longueur en centimètres
S	sa section en centimètres carrés
V	son volume en centimètres cubes
R	sa résistance en ohms
I	l'intensité du courant en ampères
u	la perte de charge en volts
p	— puissance en watts.

Ces relations sont directement déduites de la loi d'Ohm. — On a

Masse, en grammes

$$M = l.S.D = \frac{\rho D l^2}{R}.$$

Résistance, en ohms

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho D l^2}{M}.$$

Volume, en centimètres cubes

$$V = l.\ S = \frac{\pi l d^2}{4} = \frac{\rho l^2}{R}.$$

Section, en centimètres carrés

$$S = \frac{\rho l}{R} = \frac{\rho l I}{u}.$$

Perte de charge, en volts

$$u = R.I = \frac{\rho I l}{S}.$$

Perte de puissance, en watts

$$p = R.\ I^2 = \frac{u^2}{R} = \frac{\pi u^2 d^2}{4\rho l} = \frac{4\rho l}{\pi d^2} I^2.$$

Exemples numériques. — Calculer la résistance à 0° d'un fil de cuivre de 1000 mètres de longueur et de 2 millimètres carrés de section, la résistance spécifique du cuivre étant de 1,6 microhm-centimètre.

On aura :

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{1,6 \times 100 \times 100}{\frac{1}{50}} = 0,8 \text{ ohm},$$

toutes les dimensions étant exprimées en centimètres.

— Calculer la résistance à 0° d'un fil de cuivre de 100 mètres de longueur et de 2 millimètres de diamètre, la résistance spécifique du cuivre étant toujours de 1,6 microhm-centimètre.

La section S sera

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = 3,14 \text{ mm},$$

et, en la remplaçant par sa valeur dans la formule

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

on trouve, en opérant comme ci-dessus :

$$R = 0,5 \text{ ohm}.$$

— Calculer la perte de charge due à un conducteur de 100 ohms de résistance traversé par un courant de 10 ampères.

La formule :

$$u = R.\ I$$

donne $u = 100 \times 10 = 1000$ volts.

La *chute de potentiel* entre les deux extrémités du conducteur est donc de 1 000 volts.

— Calculer l'intensité du courant qui traverse un conducteur de 10 ohms de résistance entre les extrémités duquel existe une différence de potentiel de 5 volts.

On a :

$$u = RI \quad \text{ou} \quad 5 = 10I,$$

d'où :

$$I = \frac{5}{10} = 0,5 \text{ ampère.}$$

Résistance ohmique d'un conducteur parcouru par un courant alternatif. — D'une façon générale, si l'on désigne par R_c la résistance d'un conducteur au courant continu et R_a sa résistance à un courant alternatif de fréquence $\frac{1}{T}$, donnée, on a la relation :

$$R_a = kR_c$$

k étant un coefficient numérique dépendant et du diamètre d du fil et de la fréquence $\frac{1}{T}$ du courant.

Ce coefficient k est le même pour chaque valeur de la quantité $\frac{d^2}{T}$.

M. Hospitalier a dressé une table donnant, entre des limites très étendues, les valeurs de k pour un conducteur de cuivre, et dont l'emploi permet l'application facile de la formule ci-dessus :

TABLEAU DES VALEURS DE k

$\frac{d^2}{T}$	k	$\frac{d^2}{T}$	k
0	1	1620	1,8628
20	1	2000	2.0430
80	1,0001	2420	2.2190
180	1,0258	2880	2,3937
320	1.0805	5120	3,0956
500	1.1747	8000	3,7940
720	1,3180	18000	5,5732
980	1,4920	32000	7,3250
1280	1,6778		

Voici un exemple numérique :

Calculer la résistance effective d'un conducteur en cuivre de 2 centimètres de diamètre traversé par un courant alternatif de fréquence $\frac{1}{T} = 80$ périodes par seconde, sa résistance électrique mesurée au pont de Wheatstone étant de 3 ohms.

On a :

$$d = 2 \quad d^2 = 4 \quad \frac{d^2}{T} = 320.$$

Le tableau ci-dessus indique pour k une valeur de 1,0805, et l'on a :

$$R_a = kR_c = 3 \times 1,0805 = 3,2415 \text{ ohms.}$$

Lorsque la valeur du quotient $\frac{d^2}{T}$ est supérieure à 32 000, on calcule la résistance du conducteur plein comme si elle était égale à celle d'un conducteur tubulaire de même diamètre extérieur et dont l'épaisseur serait égale à :

$$6,38 \sqrt{T} \text{ centimètres.}$$

S'il s'agit d'un conducteur en un métal non magnétiqueet de résistivité ρ (en unités C.G.S.), on doit multiplier $\frac{d^2}{T}$ par

$$\frac{1\,597}{\rho},$$

rapport de la résistivité du cuivre pur à celle du métal considéré, et chercher dans le tableau ci-contre la valeur de k correspondante.

Résistance spécifique des alliages. — Quand un conducteur est formé par un alliage ou par un métal impur, sa résistance spécifique est toujours plus grande que celle des métaux qui entrent dans sa composition.

Ainsi, un alliage de 2 parties d'argent et d'une partie de platine a pour résistance spécifique 31,582 microhms-centimètre, alors que, si les deux métaux étaient pris isolément, cette résistance serait de 3,99 microhms-centimètre.

La résistance d'un conducteur fait d'un seul métal *industriel* est toujours plus grande que celle du même conducteur en métal pur.

La résistance spécifique du cuivre ordinaire est d'environ 2 pour cent plus forte que celle du cuivre pur.

La résistance spécifique pratique du fer est de 15 à 20 pour cent plus forte que le chiffre théorique.

Résistivité des corps non métalliques. — La résistance spécifique des corps non métalliques est beaucoup plus grande que celles des métaux; mais par contre elle diminue au fur et à mesure que la température s'élève.

Celle du verre, par exemple, est presque infinie à la température ordinaire ; mais à 400° C elle devient égale à 1 350 000 ohms-centimètre.

La résistivité de la gutta-percha varie dans une grande mesure d'un échantillon à l'autre. Cette variation peut être, entre deux échantillons, figurée par le rapport de 1 à 20.

A la température de 24° C, certains échantillons présentent une résistivité de 25.10^{12} ohms-centimètre, et d'autres une résistivité de 500.10^{12} ohms-centimètre.

Pour un même échantillon, elle dépend de la température, de la pression extérieure, de la durée d'électrisation et du degré hygrométrique du milieu qui la renferme.

Influence de la température. — D'après MM. Clark et Bright, on peut tenir compte de ce facteur en calculant la résistance d'après la formule :

$$R = R_0 . 0{,}8944^{\theta}$$

dans laquelle R est la résistance cherchée, R_0 la résistance à 0°, et θ la température considérée.

Influence de la durée d'électrisation. — La résistance spécifique de la gutta-percha augmente avec la durée du courant qui la traverse : la variation est d'autant plus faible que la température est plus élevée, comme on peut s'en rendre compte par l'examen du tableau ci-dessous :

Minutes d'électrisation	Résistivité à 0°C	Résistivité à 24°C
1	100	5,51
2	127,9	6
5	163.1	6,66
10	190,9	6,94
20	230,8	7,38
30	250,6	7,44
60	290,4	7,60
90	318,3	7,66

On adopte généralement dans l'essai d'un câble *une minute* comme durée d'électrisation.

Influence de la pression. — La formule empirique

$$R_p = R\,(1 + 0{,}00327p)$$

permet de calculer la résistance R_p sous une pression donnée en fonction de cette pression p et de la résistance R à la pression atmosphérique.

Le facteur p est exprimé en kilogrammes par centimètre carré.

RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE DU VERRE. — Le verre dur de Bohême est 10 à 15 fois moins résistant que le verre ordinaire à base de soude et de chaux, de poids spécifique 2,539 et dont la résistivité en millions de mégohms-centimètre, est de :

0,705	à + 61° C
90	à + 20
7970	à — 17

Le cristal de densité 2,993 présente, au contraire, une résistivité 1 000 à 1 500 plus grande que celle du verre : celle-ci, en millions de mégohms-centimètre, est de :

6182	à + 46° C
11,6.	à + 105

RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE DU CAOUTCHOUC. — Cette résistivité est de :

32000.10^{12} ohms-centimètre.	à 0° C
7500.10^{12} —	24

VARIATION DE LA RÉSISTANCE SPÉCIFIQUE DES CORPS AVEC LA TEMPÉRATURE. — La résistance spécifique des métaux croît avec la température ; exception est faite pour certains alliages.

Mathiessen a exprimé cette variation par la formule :

$$R = R_0(1 + a\theta + b\theta^2),$$

dans laquelle R représente la résistance cherchée à la température θ° C au dessus de zéro, R_0 la résistance à 0° C, et a et b des coefficients variables d'un métal à l'autre et dont voici la valeur :

	a	b
Métaux très purs	+ 0,003824	+ 0,00000126
Argent allemand	+ 0,0004433	+ 0,00000152
Alliage d'argent de platine	+ 0,00031	»
Alliage d'or et d'argent	+ 0,0006999	— 0,000000062
Fer	+ 0,0063	+ 0,000000240
Cuivre-zinc	+ 0,003824	+ 0,000000126
Maillechort	+ 0,000433	+ 0,000000152
Mercure	+ 0,0007485	— 0,000000398

Exemples numériques. — Calculer la résistance, à la température de 45° centigrades, d'un fil de cuivre chimiquement pur, recuit, de 530 mètres de longueur et de 2,4 millimètres de diamètre.

On aura :

$$R = \frac{53\,000}{3{,}14 \times \frac{2{,}4^2}{4} \times \frac{1}{1{,}584}} (1 + 0{,}003824 \times 45$$
$$+ 0{,}00000126 \times 45^2) = 2{,}2 \text{ ohms}.$$

— Calculer la résistance, à la température de 30° centigrades, d'un fil de maillechort de 100 mètres de longueur et de 2 millimètres de diamètre.

On aura :

$$R = \frac{10\,000}{3,14 \times \frac{2^2}{4} \times \frac{1}{20,76}} (1 + 0,000433 \times 30 +$$

$$0,000000152 \times 30^2) = 6,76 \text{ ohms.}$$

A la température de 100° C la résistance du même fil serait de 6,97 ohms.

La variation de résistance due à la température est donc insignifiante pour cet alliage.

CIRCUITS ÉLECTRIQUES

Circuits dérivés. — Si entre deux points C et D d'un conducteur AB on établit, tout en laissant subsister le premier, un ou plusieurs autres conducteurs, ces derniers prennent le nom de *circuits dérivés* (Fig. 37).

Résistance réduite. — Par l'établissement de circuits dérivés sur un conducteur on diminue la résistance de l'ensemble.

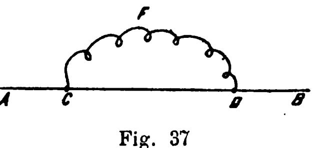


Fig. 37

Soient R la résistance du conducteur primitif, et R_1 R_2 R_3..... R_n la résistauce de chacun des n circuits dérivés entre deux de ses points, la *résistance réduite* r de ces $n + 1$ circuits est

$$r = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}}.$$

C'est la *résistance combinée* des $n + 1$ circuits dérivés.

Cas de plusieurs sources de force électromotrice en circuit. — La loi d'Ohm est encore applicable lorsque le circuit contient plusieurs sources de force électromotrice.

Supposons deux conducteurs AB, CD, de résistances R et R', reliant deux sources de force électromotrice.

Soient V et V_1 les potentiels en A et C, et V' V'_1 les potentiels en B et D, et $V > V_1$, $V' > V'_1$.

On aura :

$$I = \frac{(V - V_1) \pm (V' - V'_1)}{R + R'},$$

et, si on désigne par E la force électromotrice correspondant à $V - V_1$ et par e la force électromotrice correspondant à $V' - V'_1$,

$$I = \frac{E \pm e}{R + R^1}.$$

L'action de la force électromotrice e s'ajoute à celle de la force électromotrice E ou s'en retranche suivant qu'elle produit un relèvement ou un abaissement du potentiel dans le sens du courant, c'est-à-dire suivant qu'elle tend à augmenter ou à réduire l'intensité.

Lois de Kirchhoff. — On désigne sous cette dénomination deux lois dont l'une est déduite de la loi d'Ohm et qui permettent de résoudre les questions relatives aux circuits complexes.

1re *Loi.* — En tout nœud d'un réseau la somme algébrique des intensités est nulle.

L'évidence de cette loi dispense de commentaires.

2e *Loi.* — Dans tout circuit fermé, la somme algébrique des forces électromotrices est égale à la somme al-

gébrique des produits des intensités par les résistances des conducteurs.

Si l'on désigne par $R_1 R_2 \ldots\ldots R_5$ et par $I_1\ I_2 \ldots\ldots I_5$ les résistances de 5 circuits et l'intensité des courants qui les traversent respectivement, par E la force électromotrice de la source, on aura en un des nœuds la relation :

$$\Sigma I = 0$$
$$E = \Sigma RI.$$

Si d'autres sources de force électromotrice se trouvaient réparties sur ces conducteurs, on aurait, comme dans le cas de la loi d'Ohm :

$$E + \Sigma e = \Sigma RI.$$

L'application de la loi de Kirchhoff à une combinaison de n conducteurs conduit à l'établissement de n équations distinctes. Connaissant la ou les forces électromotrices et les intensités respectives des courants qui traverseront les n conducteurs, on pourra calculer leur résistance.

Corollaires de Bosscha. — Si le courant est nul dans l'une des branches d'un ensemble de circuits fermés, les intensités dans les autres branches sont indépendantes de la résistance du conducteur dans lequel l'intensité du courant est nulle.

Cette résistance peut varier de zéro à l'infini sans détruire l'équilibre existant.

Lorsque deux branches d'un réseau sont telles qu'une force électromotrice placée dans la première n'envoie aucun courant dans la seconde, on peut faire varier la résistance de la première sans troubler le régime établi dans la seconde.

Effets calorifiques produits par le passage du courant.

Le passage du courant détermine toujours une élévation de la température du conducteur : il y a donc eu production d'une certaine quantité de chaleur.

La marche du phénomène calorifique est régie par la loi suivante :

Loi de Joule. — La quantité de chaleur développée dans un conducteur par le passage d'un courant pendant un temps t est proportionnelle au temps, à la résistance du conducteur et au carré de l'intensité du courant :

$$Q = I^2 R.t.$$

Cette formule peut se mettre sous l'une des formes suivantes :

$$Q = \frac{E^2}{R} t.$$

$$Q = EI.\ t.$$

Énergie du courant électrique. — L'équivalence admise de la chaleur et du travail autorise à traduire en unités mécaniques l'énergie dissipée dans le conducteur sous forme de chaleur. C'est ainsi que l'on pourra exprimer cette quantité de chaleur en joules, kilogrammètres, chevaux-heure, calories, R, I, E, t, étant respecti-

vement exprimés en ohms, ampères, volts et secondes :

$$Q \text{ joules} = RI^2t = EIt = \frac{E^2t}{R}$$

$$Q \text{ kilogrammètres} = \frac{RI^2t}{9,81} = \frac{EIt}{9,81} = \frac{E^2t}{9,81\,R}$$

$$Q \text{ chevaux-heure} = \frac{RI^2t}{9,81 \times 270\,000} = \frac{EIt}{9,81 \times 270\,000}$$

$$= \frac{E^2t}{9,81 \times 270\,000 \times R} = \frac{RIt}{736 \times 3\,600} = \frac{E^2t}{736 \times 3\,600 \times R}$$

$$Q \text{ calories (g-d)} = \frac{RI^2t}{9,81 \times 0,425} = \frac{EIt}{9,81 \times 0,425}$$

$$= \frac{E^2t}{9,81 \times 0,425 \times R} = \frac{RI^2t}{4,17} = \frac{EIt}{4,17} = \frac{E^2t}{4,17\,R}.$$

Si le conducteur est le siège d'un courant alternatif, la quantité de chaleur dégagée sera toujours :

$$Q = RI^2\,t$$

où I est l'intensité *efficace* définie comme on le verra plus loin, et R la résistance du conducteur en ohms calculée pour la fréquence du courant considéré, comme il a été indiqué ci-dessus.

PUISSANCE DU COURANT. — La puissance d'un courant s'exprime en *watts* et s'évalue par le produit de l'intensité par la différence de potentiel entre les extrémités du conducteur :

$$P \text{ watts} = EI.$$

Un *watt* valant 9,81 kilogrammètres par seconde, la puissance du courant pourra être figurée par :

$$P \text{ kilogrammètres par seconde} = \frac{EI}{9,81}.$$

Sa valeur en chevaux-vapeur sera :

$$P \text{ chevaux-vapeur} = \frac{E.I}{9,81 \times 75} = \frac{E.I}{736},$$

un cheval-vapeur valant 75 kilogrammètres par seconde.

Exemples numériques. — Calculer la quantité de calories dégagées par le passage, pendant 5 secondes, d'un courant de 10 ampères dans un conducteur de 100 ohms de résistance.

$$Q = \frac{RI^2t}{4,17} = \frac{100 \times 10 \times 10 \times 5}{4,17} = 11\,990 \text{ calories (g-d).}$$

— Calculer le travail en kilogrammètres accompli et la puissance en chevaux-vapeur développée par ce même courant :

$$W = \frac{RI^2.t}{9,81} = \frac{100 \times 10 \times 10 \times 5}{9,81} = 5\,097 \text{ kilogrammètres.}$$

$$P = \frac{RI^2}{9,81 \times 75} = \frac{100 \times 10 \times 10}{9,81 \times 75} = 13,6 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Élévation de température du conducteur. — Soient I l'intensité du courant, d le diamètre du conducteur et θ la température au-dessus de zéro atteinte par le conducteur. On aura à la relation :

$$\theta = \frac{5,37}{10^4}\frac{I^2}{d^3}\,1,003713^{\theta}.$$

Si le conducteur est recouvert d'une couche isolante, et que θ_1 représente la température de l'enveloppe, θ_2 celle du conducteur, d' le diamètre du conducteur y compris l'épaisseur de l'enveloppe, le milieu ambiant étant à 0°, on aura :

$$\theta_2 = \frac{5,37}{10^4}\frac{I^2}{d'^3}\,1,003713^{\theta_2}\left(1 + 0,13.\log\frac{d'}{d}\right).$$

CHAPITRE III

ÉLECTROMAGNÉTISME

Un conducteur traversé par un courant électrique donnant lieu à des phénomènes identiques à ceux que produirait un aimant, on a été amené à assimiler l'un à l'autre. La figure 38 montre la disposition relative des lignes de force dans le champ produit par un courant rectiligne.

Par suite un *courant fermé* pourra être considéré comme un *feuillet magnétique*.

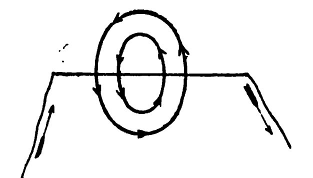


Fig. 38.

Un courant produit donc un champ magnétique et toutes les conséquences de l'existence d'un champ.

L'*Intensité du champ* produit par un courant d'intensité i à une distance l est

$$\mathcal{H} = k\frac{i}{l}.$$

La *force* exercée par ce même courant sur un pôle magnétique de masse m, à la distance l, est

$$f = k\frac{mi}{l}.$$

Un courant circulaire étant assimilable à un feuillet

magnétique, il possédera comme ce dernier un pôle N et un pôle S.

La règle suivante permet de déterminer aisément la polarité de chaque face du circuit : lorsque, pour un observateur regardant une des bases du feuillet, le courant circule dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre, la face considérée est un pôle Sud ; elle est un pôle Nord dans le cas contraire.

Énergie intrinsèque d'un courant isolé. — Soit i l'intensité du courant et L le flux produit par ce courant dans son circuit, quand l'intensité est égale à une unité. Cette énergie est

$$W = \frac{Li^2}{2}.$$

C'est elle qui se transforme en extra-courant à la rupture.

Énergie d'un courant placé dans un champ magnétique. — Soient i l'intensité du courant et Φ le flux traversant la face négative du circuit, on aura

$$W' = -\Phi i.$$

Un courant mobile dans un champ magnétique tend à se placer de façon à embrasser le plus grand flux de force possible par sa face négative.

Énergie relative de deux courants. — Soient i et i' les intensités des courants traversant les deux circuits,

$$W = -ii'L.$$

L, appelé *coefficient d'induction mutuelle* des deux circuits, est le flux qui traverse les faces négatives des circuits lorsque l'intensité des courants est égale à une unité.

Il s'évalue en *henrys*.

Règle de Faraday. — Le travail accompli par un

conducteur qui se déplace dans un champ est égal au produit de l'intensité du courant par le flux de force (ou nombre de lignes de force) coupé par le conducteur.

SOLÉNOÏDE. — Un solénoïde est formé par une série de courants fermés et parallèles.

La figure 39 indique la direction des lignes de force et la polarité des extrémités du solénoïde. Un solénoïde est analogue à un barreau aimanté.

Un solénoïde formé par n courants circulaires d'intensité i développe, par unité de longueur, un champ dont l'intensité à l'intérieur du cylindre est

$$H = 4\pi nis,$$

s représentant la section de la bobine exprimée en centimètres carrés.

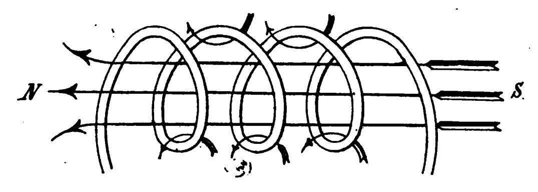


Fig. 39. — Champ produit par un solénoïde.

TIRE-BOUCHON DE MAXWELL. — La règle suivante permet de trouver facilement le sens des lignes de force qui traversent une bobine : on suppose un tire-bouchon placé dans le prolongement de l'axe de la bobine et animé d'un mouvement de rotation de même sens que celui de la circulation du courant. L'avancement du tire-bouchon donnera le sens des lignes de force à l'intérieur.

ÉLECTRO-AIMANT. — On désigne sous ce nom l'ensemble formé par un noyau de fer doux enveloppé par les spires d'un solénoïde.

Si l'on désigne par N le nombre total de spires du solénoïde, par l sa longueur, par I l'intensité du courant qui y circule, et par μ la perméabilité du fer qui forme le noyau, l'intensité du champ à l'intérieur du solénoïde sera

$$\mathcal{H} = 4\pi \frac{NI}{l},$$

et l'induction spécifique du noyau :

$$\mathcal{B} = \mu \mathcal{H} = \frac{4\pi NI\mu}{l}.$$

L'induction totale, ou le flux, pour une section S du noyau aura pour expression :

$$\mathcal{B}S = \Phi = \frac{4\pi NI\mu S}{l} = \frac{4\pi NI}{\frac{l}{\mu S}}.$$

FORCE MAGNÉTOMOTRICE. — On désigne souvent le terme $4\pi NI$ sous le nom de *force magnétomotrice* que l'on représente par $\mathcal{F}$.

FORCE MAGNÉTISANTE. — L'expression $\frac{4\pi NI}{l}$ a reçu le nom de *force magnétisante*. On la représente par $\mathcal{H}$.

L'expression

$$\Phi = \mathcal{B}S = \frac{4\pi NI}{\frac{l}{\mu S}}$$

montre que le *flux total* Φ est égal au quotient de la force

magnétomotrice par la résistance magnétique du circuit :

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}.$$

Dans le cas où le circuit magnétique serait constitué par plusieurs éléments hétérogènes de longueurs, sections et perméabilités, $l, l' \ldots s, s' \ldots \mu, \ldots,$ on aurait

$$\Phi = \frac{4\pi NI}{\frac{l}{\mu s} + \frac{l'}{\mu' s} + \ldots\ldots}.$$

La force magnétomotrice qui produit un flux Φ est, en unités C. G. S.,

$$\mathcal{F} = 4\pi NI = \Phi\left(\frac{l}{\mu s} + \frac{l'}{\mu' s} + \ldots\ldots\right),$$

et en ampères-tours, l'intensité étant exprimée en ampères :

$$NI = \frac{10\Phi}{4\pi}\left(\frac{l}{\mu s} + \frac{l'}{\mu' s} + \ldots\ldots\right)$$
$$= 0{,}8\Phi\left(\frac{l}{\mu s} + \frac{l'}{\mu' s} + \ldots\ldots\right).$$

TABLEAU DES FORCES MAGNÉTISANTES. — Le tableau ci-après, établi par M. Hospitalier, donne en ampères-tours par centimètre la valeur de la force magnétisante nécessaire pour produire dans l'air, la fonte et le fer doux une induction déterminée. On obtiendra la force magnétomotrice correspondante en multipliant par la longueur l du circuit la valeur de la force magnétisante, puisque

$$\mathcal{F} = \mathcal{H}l.$$

Induction $\mathcal{B}$ en unités C. G. S.	Force magnétisante $\mathcal{H}$ en ampères-tours par centimètre		
	Air	Fonte	Fer doux
1000	800	»	»
2000	1600	»	»
3000	2400	»	»
4000	3200	4	»
5000	4000	8	1,6
6000	4800	17,2	1,95
7000	5600	33,6	2,3
8000	6400	64	2,7
9000	7200	101,6	3,2
10000	8000	150,4	4
11000	»	233,6	5,2
12000	»	»	6,8
13000	»	»	9,6
14000	»	»	13,6
15000	»	»	22,8
16000	»	»	41,6
17000	»	»	84
18000	»	»	160
19000	»	»	280

Joints. — La résistance magnétique d'un joint n'est jamais négligeable, et on l'évalue en longueur d'une colonne d'air équivalente.

Ewing et Lowe ont dressé le tableau ci-dessous qui donne la longueur, calculée en centimètres, de la colonne d'air de même résistance magnétique que le joint :

Induction $\mathcal{B}$, en unités C. G. S.	Longueur de la colonne d'air, en centimètres
4000	0.0026
6000	0,0030
8000	0,0031
10000	0,0032
12000	0,0035
14000	0,0037

La longueur moyenne équivalente du joint est, pour les inductions courantes, de 0,0033 centimètre, et l'on aura dans ces conditions :

$$\mathcal{F} = \lambda\, \mathcal{B} = 0{,}8 \times 0{,}0033\, \mathcal{B} = 0{,}0027\, \mathcal{B} \text{ ampères-tours.}$$

TRAVAIL DÉPENSÉ POUR L'AIMANTATION D'UN NOYAU. — Le travail dépensé pour développer une aimantation donnée dans un noyau de section S et de longueur l est

$$W = \frac{1}{2} \varkappa\, \mathcal{H}^2 l S.$$

Cette dépense d'énergie une fois effectuée, l'action du courant n'a plus pour effet que de maintenir l'orientation des molécules et d'échauffer les spires de la bobine.

Cette énergie latente reparaîtra sous forme d'extra-courant de rupture au moment où l'on coupera le circuit.

FORCE PORTANTE D'UN ÉLECTRO-AIMANT. — On ne doit pas dépasser par centimètre carré 10 kg pour le fer et 2 kg pour la fonte. La force portante est

$$F = 4.10^{-5}\, \mathcal{B}^2 S \text{ grammes}$$
$$F = 4.10^{-8}\, \mathcal{B}^2 S \text{ kilogrammes.}$$

S représente la section *totale* du noyau en centimètres carrés, soit 2 fois la section du noyau dans le cas d'un électro-aimant en fer à cheval agissant par ses deux pôles.

INDUCTION ET SES LOIS.

Le déplacement relatif d'un circuit et d'un champ magnétique ou galvanique produit dans ce circuit une *force électromotrice* dite *d'induction*.

La force électromotrice d'induction prendra aussi naissance si, la situation, dans l'espace, du circuit et du champ restant invariable, l'intensité de ce dernier vient à se modifier.

Ceci revient à dire que la production de la force électromotrice d'induction est due à la variation du flux de force embrassé par le circuit dans lequel elle se développe.

Si le circuit est fermé, le courant induit circulera, et ce aussi longtemps que durera la variation d'intensité du champ ou son déplacement.

On distingue trois sortes principales d'induction :

L'*induction magnétique* attribuable au déplacement relatif du circuit et du champ ou à une variation d'intensité de ce dernier ;

L'*induction mutuelle* due à une variation du champ galvanique développé par l'inducteur dans le circuit induit ;

La *self-induction* provenant des variations du champ galvanique dues au circuit lui-même.

D'une façon générale, on appelle *inducteur* le dispositif producteur du champ de force, et *induit* le circuit dans lequel se produira la force électromotrice d'induction.

La production de la force électromotrice d'induction est régie par les lois suivantes :

Lois générales de l'induction. — La variation du flux embrassé par un circuit produit dans ce circuit une force électromotrice d'induction.

La durée de la force électromotrice d'induction est égale à celle de la variation du flux de force.

La quantité d'électricité produite est indépendante de la durée de la variation ; elle ne dépend que de la valeur de cette dernière.

Deux variations du flux égales et de signes contraires produisent des effets égaux et de signes contraires. Si elles sont simultanées, la force électromotrice d'induction sera nulle.

Tout déplacement ou autre changement qui ne modifie par le flux embrassé par le circuit ne produit pas de force électromotrice d'induction.

Le sens et la valeur de la force électromotrice d'induction peuvent être déterminés par l'application des lois de Lenz, Maxwell et Faraday que nous résumons ci-dessous.

Loi de Lenz. — Tout déplacement relatif d'un circuit et d'un champ développe une force électromotrice d'induction qui tend à s'opposer au mouvement.

Ainsi, le courant induit développé dans un solénoïde par le rapprochement d'un autre solénoïde excité par un courant est de sens contraire au courant d'excitation.

Un observateur couché dans le champ, parallèlement aux lignes de force qui lui entrent par les pieds, et regardant le conducteur dans le sens du mouvement, verra le courant produit par le déplacement se diriger de sa gauche à sa droite.

Loi de Maxwell. — On peut exprimer la même idée sous la forme adoptée par Maxwell, en disant que :

Le sens du courant induit dans un circuit par une variation donnée de flux de force est tel qu'il s'oppose à chaque instant à la variation par le flux qu'il produit lui-même.

Si le flux augmente, le courant induit devra être de sens inverse à celui qui produit le flux.

Si le flux diminue, le courant sera de même sens que celui qui produit le flux.

Le sens du courant induit change donc chaque fois que le flux inducteur passe par un minimum ou un maximum.

Le courant induit ajoute algébriquement son effet à celui d'un courant permanent qui peut préexister dans l'induit.

Règle de Faraday. — La force électromotrice d'induction développée dans un conducteur a pour mesure, à chaque instant, le quotient du flux de force coupé par le temps mis à le couper.

Ceci revient à dire que cette force électromotrice est numériquement égale à la longueur du conducteur multipliée par l'intensité du champ et par la projection normale aux lignes de force du déplacement effectué dans le temps considéré.

Si l'on désigne par e la force électromotrice d'induction, par H l'intensité du champ, par l la longeur du circuit, par v sa vitesse de déplacement, par φ l'angle de la direction du mouvement avec celle de la force exercée par le champ, par α l'angle du conducteur avec la direction des lignes de force, on aura

$$e = Hvl \sin \alpha \cos \varphi.$$

Cette relation devient

$$e = Hvl \sin \alpha$$

si le conducteur se meut dans la direction de la force.

D'une façon générale on posera :

$$E = \frac{d\Phi}{dt}$$

$$Q = \frac{\Phi}{R}$$

$$I = \frac{d\Phi}{R \cdot dt},$$

Φ représentant le flux de force et R la résistance du circuit.

COEFFICIENT D'INDUCTION MUTUELLE. — Ce coefficient est égal au quotient du flux de force, embrassé par le premier circuit, par l'intensité du courant qui traverse le second :

$$L_m = \frac{d\Phi}{dI}.$$

La quantité d'électricité induite quand l'intensité passe de 0 à la valeur I, sera

$$Q = \frac{\Phi}{R} = \frac{L_m I}{R},$$

et la force électromotrice induite à chaque instant,

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -L_m \frac{dI}{dt}.$$

SELF-INDUCTION. — Toute variation de l'intensité du courant qui traverse un circuit produit une force électromotrice d'induction ; le quotient de la variation du flux de force, embrassé par le circuit, par la variation de l'intensité du courant qui le parcourt s'appelle *coefficient de self-induction*

$$L = \frac{d\Phi}{dI}.$$

L'unité pratique de coefficient de self-induction est l'*henry* qui vaut 10^9 centimètres.

FORCE ÉLECTROMOTRICE D'INDUCTION

Deux cas particuliers se présentent : la force électromotrice agit sur un circuit dépourvu de self-induction

ou elle agit sur un circuit non dépourvu de self-induction.

Nous les examinerons successivement.

Premier cas. — Le *circuit* est *dépourvu de self-induction.*

Lorsqu'une force électromotrice sinusoïdale agit sur un circuit dépourvu de self-induction, l'intensité et la force électromotrice du courant induit passent par des maxima et des minima, et ont chacune, à un instant t compté à partir de l'origine des temps, une valeur définie, variable d'un instant à l'autre mais périodique.

Si l'on affecte du symbole o les valeurs maxima de I et de E à l'origine, et du symbole t leurs valeurs à l'instant t on aura :

$$E_t = E_o \sin \frac{2\pi t}{T}$$

$$I_t = \frac{E_o \sin \frac{2\pi t}{T}}{R}.$$

La *force électromotrice moyenne*

$$E_m = \frac{2}{\pi} E_o = 0,6366\ E_o.$$

L'*intensité moyenne*

$$I_m = \frac{2}{\pi} I_o = 0,6366\ I_o.$$

La *force électromotrice efficace*

$$E_{eff} = \sqrt{E^2_m} = \frac{E_o}{\sqrt{2}} = 0,707\ E_o.$$

L'*intensité efficace*

$$I_{eff} = \sqrt{I^2_m} = \frac{I_o}{\sqrt{2}} = 0,707\ I_o.$$

La *puissance moyenne*

$$P_{moy} = E_{eff} \cdot I_{eff}.$$

Deuxième cas. — Si, au contraire, le circuit possède un coefficient de self-induction L, les choses se passeront différemment.

La valeur de I_t deviendra

$$I_t = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2 L^2}{T^2}}} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \varphi\right)$$

avec la condition

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi L}{RT}.$$

On peut encore exprimer cette relation sous la forme :

$$I_t = \frac{E_0 \cos \varphi}{R} \sin\left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi\right).$$

La valeur maxima de I

$$I_0 = \frac{E_0 \cos \varphi}{R}$$

est donc inférieure à ce qu'elle aurait été, $I_t = \frac{E_0}{R}$, dans un circuit siège d'une force électromotrice constante.

Cette différence en moins provient de l'influence exercée par la self-induction. Et, d'une façon générale, on dit que la self-induction d'un circuit augmente *en apparence* sa résistance, et l'on appelle :

Impédance ou *Résistance apparente* d'un circuit le terme

$$\sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2 L^2}{T^2}}.$$

La relation

$$I_0 = \frac{E_0 \cos \varphi}{R}$$

indique en outre que la force électromotrice et l'intensité n'ont pas leur valeur maxima au même instant. Il existe entre elles un *décalage*, un *retard* du maximum de I sur celui de E égal à

$$\frac{T\varphi}{2\pi}.$$

On établit en outre les relations

$$I_{moy} = \frac{E_{moy}}{\sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2 L^2}{T^2}}}$$

$$I_{eff} = \frac{E_{eff}}{\sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2 L^2}{T^2}}},$$

et, si la vitesse de rotation du circuit est très grande et que sa résistance soit faible par rapport à son coefficient de self-induction,

$$I_t = \frac{E_0}{\frac{2\pi L}{T}} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{2}\right),$$

car

$$\varphi = \frac{\pi}{2}.$$

Dans cette dernière hypothèse, le *décalage* est égal au quart de la période.

La *puissance moyenne* produite par le générateur est égale à la *puisssance moyenne* perdue dans le circuit sous forme de chaleur ou en échauffement, et représentée par l'une des trois expressions :

$$P_{moy} = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} E_t I_t dt = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} RI^2_t dt = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \frac{E^2_t}{R}\, dt.$$

Lorsque le décalage est égal au quart d'une période :

$$P_{moy} = \frac{E_0 . I_0}{2} \cos \varphi$$

$$P_{moy} = E_{eff}.I_{eff}. \cos \varphi$$

$$P_{moy} = RI^2_{eff} = \frac{RE^2_0}{2\left(R^2 + \frac{4\pi^2 L^2}{T^2}\right)}.$$

La *puissance moyenne* varie avec la résistance du circuit et passe par un maximum pour $R = \frac{2\pi L}{T}$; elle devient alors égale à

$$P_{moy.\,max} = \frac{E^2_0}{4R} = \frac{E^2_{eff}}{2R},$$

et le décalage est égal au huitième de la période.

PÉRIODE, FRÉQUENCE, PHASE. — Aussi bien pour l'étude des courants alternatifs que pour l'établissement des devis avec emploi de ces courants, il y a lieu de tenir compte de la signification des termes, *Période*, *Fréquence*, *Phase*.

Si l'on considère une spire S passant d'un pôle A à un pôle B, la force électromotrice induite en elle diminuera jusqu'à la position NN sur la ligne neutre, où elle sera nulle, pour augmenter ensuite pendant le trajet NB ; elle reprendra, arrivée en B, sa valeur maximum, égale mais de signe contraire à celle qu'elle avait en A. Elle diminuera ensuite et redeviendra nulle en N_1N_1, ligne neutre entre les pôles B et C, et ainsi de suite (Fig. 40).

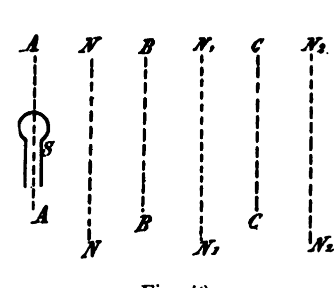


Fig. 40.

Si l'on représente par les ordonnées la valeur de la force électromotrice développée pendant le trajet $ANBN_1C$ et le temps par les abscisses, on aura la courbe sinusoïdale ci-dessous (Fig. 41).

L'intervalle de temps compris entre les passages de la spire en deux points où les valeurs de la

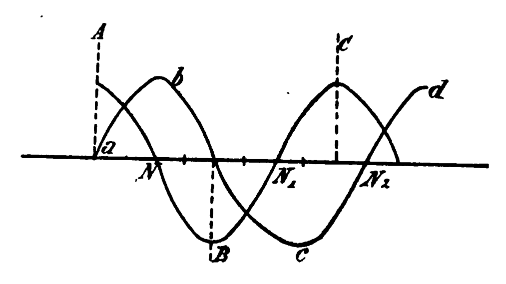


Fig. 41. — Deux courants de même période, mais décalés.

force électromotrice sont maxima ou minima est la *pé-*

riode. Dans l'exemple ci-dessus on pourra mesurer la période par AC.

La *fréquence* est le nombre de périodes dans un temps donné ; on la mesure en *périodes par seconde*. Si deux courants ont des périodes égales, mais ne coïncidant pas entre elles, ils présenteront une *différence de phase*.

Ainsi (Fig. 41), les force électromotrices $ABCN_2$ et *abcd* sont décalées d'un quart de période, et l'on dit qu'il existe entre elles et entre les deux courants une différence de phase d'un quart de période.

Courants de Foucault. — Une masse métallique en mouvement soumise à l'influence d'un champ magnétique devient le siège d'une force électromotrice d'induction : elle est parcourue par des courants perpendiculaires aux lignes de force du champ et dont l'influence se manifeste par l'échauffement de la masse et une augmentation de sa résistance au déplacement.

On évite ces effets en sectionnant la masse parallèlement aux lignes de force du champ inducteur, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction des courants de Foucault.

S'il s'agit du noyau d'un électro-aimant, on emploiera, au lieu d'un bloc de fer doux, soit un faisceau de fils de fer vernis à la gomme-laque, soit un assemblage de lames de tôle isolées entre elles par du papier gomme-laqué.

Cette dernière disposition a trouvé de nombreuses applications dans la construction des dynamos.

Une masse métallique immobile, mais soumise à l'action d'un champ d'intensité variable, sera le siège des mêmes phénomènes.

Très fréquemment les carcasses des bobines sont faites

de cuivre, et l'on annule l'action des courants de Foucault en les fendant par un trait de scie parallèle à l'axe.

Self-induction d'un conducteur cylindrique. — La densité du courant sinusoïdal qui circule dans un conducteur cylindrique n'est pas constante en chaque point d'une section perpendiculaire à l'axe de ce conducteur.

La densité est minima au centre de la section, et maxima vers la phériphérie.

Cette anomalie est due à des phénomènes de self-induction qui viennent en outre accroître la résistance apparente du conducteur, comme on en peut juger par les chiffres suivants établis par M. Mordey.

Fréquence du courant, en périodes par seconde	Diamètres des conducteurs, en millimètres	Accroissements apparents de résistance, pour cent	Intensités, en ampères
80	10	moins de 1	55
80	15	2,5	133
80	20	8	220
80	21	17,5	»
80	40	68	»
80	100	330	»
80	1000	3500	»
100	9	moins de 1	45
100	13.4	2,5	98,5
100	18	8	17,8
100	224	17,5	»
133	7,70	moins de 1	32
133	11,61	2.5	74
133	15,5	8	131,4
133	19,36	17,5	»

La résistance, en ohms. d'un conducteur de longueur l, de rayon r et de perméabilité μ, parcouru par un courant sinusoïdal, est

$$R_a = R_c \left(1 + \frac{1}{12}\frac{4\pi^2 l^2 \mu^2}{T^2 R_c^2} - \frac{1}{180}\frac{16\pi^4 l^4 \mu^4}{T^4 R_c^4} + \ldots\ldots\right)$$

R_c représente la résistance de ce conducteur au passage d'un courant continu.

Dans le cas du cuivre on aurait

$$R_a = R_c\left(1 + \frac{1,2\, r}{10^5 T^2}\right).$$

Dans la pratique on se sert de la formule

$$R_a = kR_c$$

dont nous avons précédemment vu le mode d'emploi. Le fer ne doit donc pas être employé pour canaliser les courants de grande fréquence, et si, en raison de l'intensité. il y a lieu de donner au conducteur une section importante, on devra, au lieu de conducteurs cylindriques, prendre de préférence des tubes.

Résistance apparente et coefficient de self-induction de circuits en dérivation. — Plusieurs circuits en dérivation, qui n'exercent pas les uns sur les autres d'action inductive, présentent chacun une résistance apparente R_a et un coefficient de self-induction apparent L déterminés par les relations

$$R_a = \frac{r}{l^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} r^2} \qquad L_a = \frac{l}{r^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} l^2},$$

dans lesquelles

$$l = \Sigma \frac{L}{R^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} L^2} \qquad r = \Sigma \frac{R}{R^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} L^2}.$$

Deux circuits présentant respectivement des résistances et des coefficients de self-induction RL, R_1L_1 et des *constantes de temps* égales, pourront être remplacés

par un *seul* circuit dont la résistance et le coefficient de self-induction seront déterminés par les relations suivantes :

$$R'' = \frac{RR_1}{R + R_1} \qquad L'' = \frac{LL_1}{L + L_1},$$

les deux bobines n'ayant pas entre elles d'induction mutuelle.

Constante de temps. — On désigne sous le nom de *constante de temps* d'un circuit de coefficient de self-induction L et de résistance r, le quotient

$$\tau = \frac{L}{r}.$$

Equilibre d'une capacité et d'une self-induction. — On peut annuler les effets produits par la self-induction d'un circuit en y intercalant un condensateur de capacité convenable. Il suffit, en effet, qu'on ait la relation

$$\frac{1}{\frac{2\pi}{T} C} = \frac{2\pi}{T} L,$$

dans laquelle C représente la capacité du condensateur.

Les effets s'équilibreront si l'on a, en simplifiant la formule ci-dessus,

$$\frac{4\pi^2}{T^2} L.C = 1.$$

Equation générale d'un circuit soumis simultanément a une force électromotrice constante et a une force électromotrice d'induction.

$$E = RI + \frac{d\Phi}{dt}$$

$$I = \frac{E - \frac{d\Phi}{dt}}{R}.$$

Mode de production d'une force électromotrice d'induction. — Le mode de production le plus simple, mais irréalisable dans la pratique, consisterait dans l'emploi d'une ou plusieurs spires animées d'un mouvement de rotation dans le champ produit, par exemple, par un électro-aimant. Il en résulterait, dans les spires, une force électromotrice d'induction variant périodiquement entre deux valeurs extrêmes, l'une maxima, l'autre minima.

La valeur de cette force électromotrice dépend de la nature du circuit induit et de celle des conducteurs extérieurs, comme on le verra au chapitre suivant.

Extra-courants. — On a vu que la mise en circuit d'un conducteur présentant de la self-induction était accompagnée de l'emmagasinement dans le conducteur, à l'état potentiel, d'une certaine somme d'énergie.

Il en résulte qu'à la fermeture du circuit correspond une dépense d'énergie

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

représentant l'établissement d'une force électromotrice de signe contraire à celle du courant agissant, d'où production d'un courant inverse du courant excitateur.

Au moment de la rupture du circuit, l'énergie latente devenue libre produira une force électromotrice de même signe que celle du courant d'excitation.

Le courant de *fermeture* et le courant de *rupture* sont de sens contraires et correspondent l'un et l'autre au transport d'une même quantité d'électricité.

Le courant de rupture dure moins longtemps que le courant de fermeture ; aussi ses effets sont-ils plus intenses que ceux du second.

On devra donc éviter de fermer et surtout d'ouvrir brusquement un circuit à grande self-induction, le courant de rupture pouvant, dans certains cas, occasionner des accidents très graves tant aux personnes qu'aux machines et appareils.

CHAPITRE IV

GÉNÉRATEURS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les machines dynamos produisant une force électromotrice d'induction par le déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique, sont des appareils qui transforment en énergie électrique l'énergie mécanique utilisée à mouvoir le circuit mobile.

Une dynamo comprendra donc deux parties essentielles, l'une fixe et l'autre mobile, mais peu importe que ce soit l'une ou l'autre qui produise le champ magnétique.

Le circuit, siège de la force électromotrice d'induction, porte le nom générique d'*induit* et la partie de la machine qui produit le champ celui d'*inducteur*.

Généralement, et surtout dans les petites machines, l'induit est mobile et l'inducteur fixe.

Si le champ magnétique est produit par un aimant permanent, la machine est dite *magnéto-électrique* ; elle est dite *dynamo électrique* si le champ est dû à un électro-aimant.

Cette dernière disposition étant aujourd'hui la seule employée nous ne parlerons que des machines dynamo électriques dites *dynamos*.

Une troisième catégorie d'organes complète une dynamo ; elle comprend les dispositifs variés, nécessaires à recueillir le courant engendré :

Le collecteur.

Les porte-balais.
Les balais.

Machines Dynamo-Électriques.

Les générateurs d'énergie électrique par induction, quelle que soit leur catégorie, nous verrons plus loin qu'il y en a trois, procèdent tous du même principe.

Si l'on suppose qu'une spire constituée par un fil métallique se meuve dans le champ produit par l'électro-aimant représenté par ses pôles NS (fig.42) et qu'elle soit animée d'un mouvement de rotation autour de l'axe *o*, elle sera le siège de forces électromotrices égales mais de signe contraire, suivant qu'elle se trouvera en S′ dans la région XSX_1 ou en S″ dans la région XNX_1.

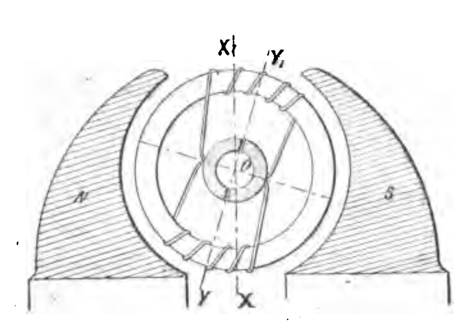


Fig. 42. — Dynamo élémentaire.

Si donc, par un artifice quelconque, on recueille le courant produit on constatera que la force électromotrice change périodiquement de signe, qu'elle sera tantôt négative et tantôt positive, 2 fois par révolution, et que ces variations se produiront en des points déterminés dits *points de commutation.*

Les *points de commutation* se trouvent toujours aux deux extrémités d'un même diamètre YOY′.

Dans une dynamo théorique ce diamètre est perpen-

diculaire à la ligne des pôles NS, mais pratiquement il est rejeté en avant, dans le sens de la rotation, en YY_1, d'un certain angle α.

Si l'induit, au lieu d'être formé d'une seule spire en contenait un nombre quelconque, également réparties de chaque côté de XX_1 les choses se passeraient de la même façon : toutes les spires situées dans la région XNX_1 seraient le siège d'une force électromotrice égale et de signe contraire à la force électromotrice développée dans les spires placées en XSX_1.

Ces spires peuvent être constituées par un fil unique, qui recouvre tout l'induit et dont les deux extrémités sont reliées chacune à une bague métallique connectée au circuit extérieur. Ce dernier sera traversé par un courant dont la force électromotrice sera tantôt positive tantôt négative, comme on l'a vu plus haut, c'est-à-dire par un *courant alternatif.*

Les machines construites sur ce principe portent le nom de *dynamos à courants alternatifs* ou *alternateurs.*

Si, par un artifice convenable, les spires sont reliées entre elles et au circuit extérieur de telle sorte que le courant dans ce dernier soit toujours de même sens, ce courant sera dit continu et la dynamo dite *dynamo à courant continu.*

Les *machines à courant redressé* tiennent le milieu entre ces deux catégories ; le courant est toujours de même sens dans le conducteur extérieur, mais la force électro-motrice subit, dans les types courants, des variations brusques et périodiques.

Les dynamos doivent présenter une résistance d'isolement élevée.

DYNAMOS A COURANT CONTINU

Nous supposons l'induit I mobile et les inducteurs E fixes.

L'induit est divisé en un certain nombre de *sections s* ou *bobines élémentaires* reliées entre elles de façon à former un circuit continu.

De chaque point de jonction de deux bobines successives part un *connecteur* qui aboutit à la *touche t* correspondante du *collecteur.*

Le collecteur compte un nombre de touches généralement égal à celui des sections : il est monté sur l'arbre de rotation de l'induit et tourne avec lui.

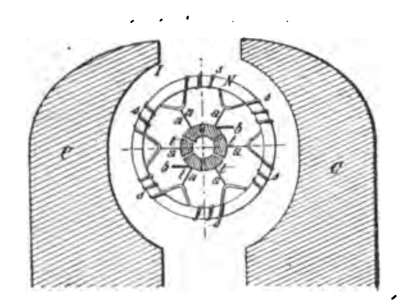


Fig. 43. — Éléments induits d'une dynamo.

Deux *balais, b* fig. 43, dans le cas d'une machine bipolaire, fixes, frottent avec le collecteur. Ils recueillent le courant engendré et l'amènent à deux *bornes* fixées avec la machine. C'est de ces bornes que partent les conducteurs constituant le circuit d'utilisation.

Modes d'enroulement de l'induit. — Sauf dans les machines à *disques* le circuit induit est toujours enroulé sur un noyau de fer. La raison en est que cette disposition diminue dans un large mesure la résistance magnifique du milieu interposé entre les pôles magnétiques des inducteurs, que les lignes de force du champ traverseront

un plus grand nombre les spires de l'induit et que comme conséquence directe la *production* de la machine sera augmentée.

Cette pièce de fer supportant le circuit induit porte le nom de *noyau de l'induit.*

Pendant la marche elle est le siège de courants de Foucault dont nous avons parlé précédemment, courants dont l'action se manifeste par un échauffement du noyau dont la température peut devenir telle que l'isolant des fils de l'induit se carbonise.

C'est pour éviter et les chances de brûler l'induit et la perte d'énergie résultant de la production de ces courants, que plusieurs constructeurs formant le noyau non plus d'une masse de fer, mais d'une série de lames de tôle douce très minces, isolées entre elles au papier gomme laqué et montées perpendiculairement à l'axe de rotation.

Dans les machines Rechniewski on a étendu cette division des noyaux à celles des inducteurs.

L'enroulement proprement dit de l'induit peut être fait de deux façons distinctes, en anneau ou en tambour.

Enroulement en anneau. — Dans cette disposition, le fil passe sur les faces extérieure et intérieure du noyau, qui a la forme d'une couronne cylindrique.

Les bobines élémentaires sont donc comme enfilées sur le noyau.

La figure 44 montre la disposition en anneau adop-

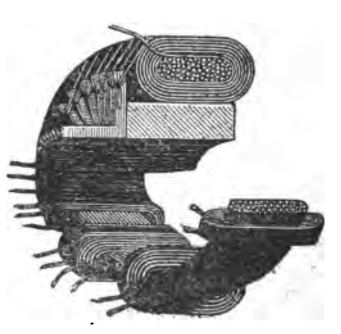


Fig. 44. — Induit en anneau.

tée dans les machines Gramme dont le noyau est formé d'un tore en fils de fer doux, isolés entre eux par un vernis à la gomme laque ou autre résine convenable.

Enroulement en tambour. — Dénommée aussi enroulement Siemens, du nom du premier constructeur qui l'ait utilisée, cette disposition diffère totalement de la précédente.

Là le fil ne porte plus que sur la face extérieure du

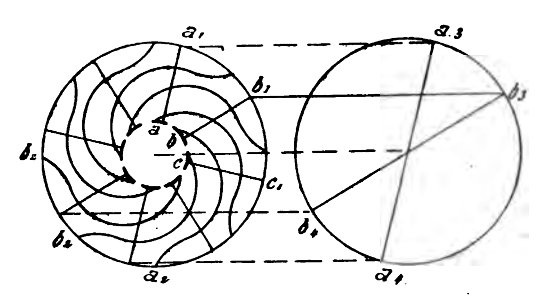


Fig. 45. — Induit en tambour.

noyau, et de plus la disposition de chaque section affecte une forme particulière.

Ces sections sont reliées entre elles de façon à former un circuit continu, la fin d'une section et le commencement de la suivante aboutissent au même connecteur.

Le mode d'enroulement peut être expliqué à l'aide de la figure schématique 45.

Partant de la touche a du collecteur, le fil prend la direction a a_1, suit le noyau cylindrique suivant une génératrice a_1 a_3, traverse diamétralement la face opposée de noyau en a_3 a_4, longe le cylindre suivant la génératrice a_4 a_2 opposée à a_1 a_3; puis de là, serpentant sur la face avant du noyau il revient en b, seconde touche du

collecteur d'où partira le commencement de la section suivante.

Le fil de cette dernière suit le chemin $b\ b_1 - b_1\ b_3 - b_3\ b_4 - b_4\ b_2 - b_2\ c$.

Et ainsi de suite.

On remarquera que les spires sont disposées symétriquement à droite et à gauche de l'arbre de rotation, et que le noyau porte des cales pour maintenir l'enroulement.

Dynamos multipolaires. — Le champ magnétique des dynamos de grande puissance est généralement formé par plusieurs électro-aimants.

Les pôles magnétiques, en nombre pair, sont alternativement de nom contraire et placés symétriquement autour de l'armature.

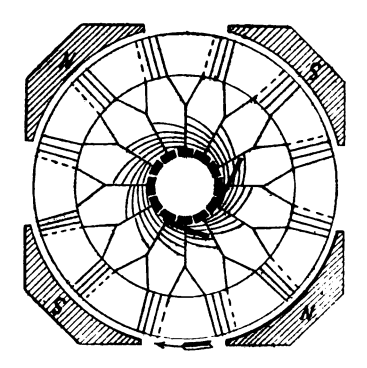


Fig. 46. — Dynamo tétrapolaire, enroulement en quantité.

En adoptant la disposition générale précédente il faudrait autant de paires de balais qu'il y a de paires de pôles, mais on évite cet inconvénient d'une façon très simple ; et généralement les dynamos multipolaires n'ont qu'une paire de balais.

On réalise cette condition en réunissant entre elles les sections de l'induit d'après, la méthode indiquée par Mordey, méthode qui permet d'obtenir avec un même induit, un courant de grande intensité ou de haute tension.

Enroulement en quantité. — Le mode de liaison des

sections dépend évidemment du nombre de pôles de la machine.

Ainsi, dans une dynamo à 4 pôles (fig. 46) on réunit entre elles les sections situées aux extrémités d'un même diamètre ; dans une machine à 6 pôles on réunira les sections qui font entre elles un angle de 120°.

Dans une machine à 4 pôles les deux balais sont placés à 90° l'un de l'autre.

Ce mode d'enroulement qui convient très bien à la production de courants intenses, a l'inconvénient de donner à la force électromotrice une amplitude d'oscillation plus grande que dans le cas d'une dynamo bipolaire ayant même nombre de lames au collecteur.

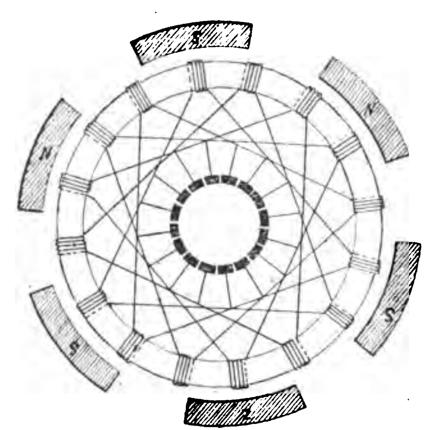


Fig. 47. — Dynamo hexapolaire, enroulement en série.

Enroulement en série. — On divise l'armature en un nombre de sections $A = a K \pm 1$, K étant un nombre entier premier avec A.

On réunit les sections de K en K suivant l'ordre des côtés d'un polygone étoilé (fig. 47).

Une seule paire de balais suffit comme dans le cas de l'enroulement en quantité.

Inducteurs. — L'électro aimant ou la série d'électro aimants qui entourent l'induit sont généralement faits

de fer doux massif ou de lames de tôle de fer doux isolées entre elles par du papier gomme laqué.

On emploie la fonte dans les machines ordinaires, et l'acier dans les types récents.

L'excitation des électro aimants est obtenue par un enroulement traversé par la totalité ou une fraction du courant de la machine.

Enroulement sur les inducteurs. — Les deux branches de chaque électro inducteur sont recouvertes d'un ou deux enroulements distincts suivant que la machine est ou non compound.

Le fil, ou les barres constituant ces enroulements sont généralement appliqués sur des carcasses en bois enfilées sur les électros ; chaque branche supporte quelquefois plusieurs de ces bobines. Ce fractionnement de l'enroulement a pour objet de faciliter les recherches en cas d'accident et ultérieurement la réparation.

Collecteur. — Il est formé par l'assemblage d'une série de lames de cuivre ; les surfaces extérieure et intérieure de la couronne ainsi constituées sont cylindriques, et le collecteur présente ainsi l'aspect d'un cylindre de cuivre.

Les lames constituantes, dénommées *touches*, ne sont pas en contact, elles sont séparées par un intervalle rempli d'une substance isolante qui peut être l'air comme dans les machines Siemens Halske, Ayrton Perry, etc.

L'isolant solide à interposer entre les touches ne devant absorber ni l'huile ni l'humidité ; le plâtre et le papier ne peuvent servir. La fibre vulcanisée, l'ardoise et surtout le mica sont les substances à préférer.

Le métal des touches doit être *dur* pour éviter une usure rapide ; on emploie soit des lames étirées, soit

des pièces forgées en cuivre dur, en bronze phosphoreux, ou alliage de cuivre et d'argent.

Le nombre de touches varie avec le mode de bobinage de l'induit et la différence de potentiel à obtenir aux bornes.

On admet généralement une différence de potentiel de 5 à 6 volts entre deux touches : une différence plus grande pourrait entraîner une usure rapide par la production d'étincelles aux balais. A égalité de puissance la machine qui produit le courant de plus haute tension aura donc le plus grand nombre de touches.

Cependant par raison d'économie, on ne peut pousser outre mesure la subdivision du collecteur.

Les dimensions des touches, longueur et épaisseur radiale, ne sont pas liées par une formule aux constantes du courant à produire : les dimensions adoptées sont le résultat de l'expérience de chacun.

On admet cependant une longueur de 3 centimètres par centaine d'ampères de débit. L'épaisseur radiale doit être suffisante pour parer à l'usure, le collecteur ayant besoin d'être tourné de temps à autre pour recouvrer sa forme cylindrique.

La largeur doit être telle que le balai ne puisse porter sur plus de deux touches à la fois.

Les touches sont fixées solidement, par emboitement, dans un manchon de bronze claveté sur l'arbre de l'induit, dont il est isolé avec le plus grand soin pour un manchon intermédiaire en fibre vulcanisée ou autre substance isolante.

Cette disposition est applicable quand l'induit est intérieur aux pôles inducteurs et que le collecteur est monté sur l'arbre de rotation ; elle ne l'est plus, quand

l'induit est extérieur aux pôles comme dans certaines machines construites par Siemens Halske et la société Alsacienne de Construction Mécanique.

Dans ce dernier cas, collecteur, balais et porte-balais doivent être différemment disposés comme on le verra plus loin.

Chaque touche est prolongée à l'arrière par une *queue* redressèe à angle droit, dont l'extrémité sera reliée au *connecteur* de la bobine correspondante de l'induit (fig. 48).

Fig. 48. — Collecteur théorique.

La longueur de la queue et son mode d'attache au connecteur varient d'un constructeur à l'autre : la liaison est obtenue générale-soit par une soudure, soit ment par le serrage du connecteur sous la tête d'une vis prise dans la queue.

La figure 48 montre la coupe théorique d'un collecteur dont les touches sont désignées par la lettre *t*, les queues par *q*, l'isolant entre deux touches consécutives par *i* et l'arbre de rotation par *a*.

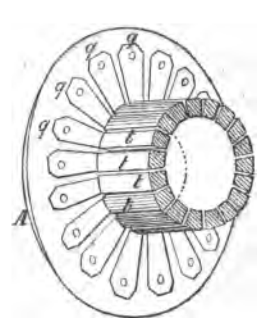


Fig. 49. — Collecteur Hochhausen.

Tous les collecteurs sont construits d'après les principes énoncés ci-dessus, ils ne diffèrent entre eux que par des dispositions de détail.

Collecteur Hochhausen. Représenté par la figure 49, il

est à isolement d'air. Les queues q sont fixées sur un disque d'ardoise A et sont reliées aux connecteurs par un serrage à vis.

Collecteur Gramme. — Il est formé par une série de lames de cuivre taillées en coin et isolées entre elles au papier ou au mica. Ces lames sont ensuite réunies en un cylindre unique qui sera fretté au moyen d'une bague également isolée (fig. 50).

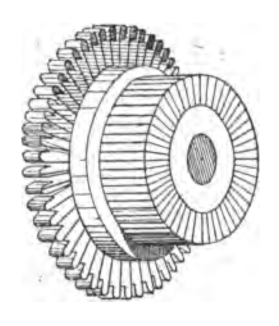


Fig. 50. — Collecteur Gramme.

A chaque lame de collecteur est soudée une lamelle en cuivre terminée par un crochet.

Collecteur extérieur Siemens Halske. — Le collecteur est formé par la surface extérieure des spires elles-mêmes, et pour faciliter la compréhension nous rappellerons brièvement la disposition de l'enroulement de l'induit.

L'induit a la forme d'un anneau cylindrique de grand diamètre, de largeur et d'épaisseur comparativement faibles ; il est mobile.

L'inducteur multipolaire de forme étoilée est fixe ; il est monté à l'intérieur de l'induit.

L'enroulement de ce dernier est formé extérieurement de barres de cuivre parallèles entre elles, disposées suivant la génératrice du cylindre ; elles constituent le collecteur de la machine.

Le collecteur d'une machine de 330 kilowatts qui a figuré à l'Exposition de Francfort en 1891, comprenait 810 touches de 1 centimètre de largeur isolées au papier. Il supportait 10 jeux de 3 balais chacun.

L'anneau mesurait 3,10 mètres de diamètre et tournait à 65 tours par minute.

Collecteur Siemens Halske. — Les touches sont faites d'une barre de cuivre recouverte d'une bande d'acier maintenue par des vis : elles sont isolées à l'air, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de matière isolante entre elles.

Ce collecteur peut être graissé en plein.

BALAIS ET PORTE-BALAIS

L'ensemble constitué par les balais et les porte-balais doit remplir certaines conditions mécaniques et électriques qui ont été formulées comme suit par Silvanus Thomson :

1. — Les balais doivent être maintenus fermement et reliés à leur circuit par un bon contact métallique.

2. — Les porte-balais doivent permettre d'avancer ou de reculer les balais à volonté.

3. — Les balais doivent être montés de manière à toucher sous un angle convenable la surface du collecteur.

4. — Ils doivent porter sur le collecteur avec une pression convenable ; s'ils ne sont pas assez serrés ils sautent et donnent lieu à des étincelles ; s'ils le sont trop ils creusent des rainures dans le collecteur.

5. — Les porte-balais doivent permettre de soulever les balais.

6. — Ils doivent également permettre de maintenir les balais hors contact, au moyen d'un encliquetage mécanique.

7. Pour toutes les machines fonctionnant au-dessus de 100 volts, des poignées isolées doivent permettre de relever et d'ajuster les balais sans risque de commotion.

8. — L'isolation des balais ou d'un balai et de son porte-balai doit être absolue.

Nombre de balais. — Il n'existe pas de règle qui détermine le nombre de balais à appliquer de part et d'autre de l'induit.

Sauf, pour les petites machines, on a pris l'habitude d'en juxtaposer plusieurs au lieu d'un seul, d'une largeur égale à celle de leur ensemble.

Cette disposition présente plusieurs avantages : tout d'abord la destruction d'un balai n'entraîne pas le remplacement de leur ensemble, puis, même pendant la marche, on peut en retirer un, le réparer et le remettre en place sans arrêter la machine. En outre, l'usure du collecteur se fait plus régulièrement.

Il n'existe pas non plus de formule permettant de déterminer les dimensions à donner aux balais d'une machine produisant un certain courant : on admet généralement que la largeur du balai devra être de 2,5 centimètres par centaine d'ampères de débit.

Dans le cas de balais à application oblique, la section oblique portant sur le collecteur devra avoir une largeur supérieure à l'intervalle de deux touches ; chaque section de l'induit doit, en effet, pouvoir être mise en court circuit pendant un instant, pour que le sens du courant puisse être renversé. Les balais de cette catégorie ne doivent pas non plus être trop épais, autrement ils s'échauffent sous l'influence de la différence de potentiel existante entre les touches du collecteur en contact avec la partie avant du balai et celles en contact avec la partie arrière.

Décalage des Balais. — Dans une dynamo parfaite la ligne neutre est placée symétriquement aux pôles magnétiques.

Nous la désignerons par nn' dans le schéma 51 d'une dynamo bipolaire, dont les inducteurs sont P. P′ — l'induit I et l'arbre de rotation a.

Mais en réalité, par suite de la réaction de l'induit sur le champ développé par P. P′, la ligne neutre est rejetée dans le sens du mouvement de rotation, en $p.\ p'$.

Si l'on plaçait les balais sur les points d'intersection de $n.\ n'$ avec le collecteur, on abîmerait rapidement collecteur et balais par suite de la production d'étincelles et de plus on ne recueillerait qu'une partie du courant produit.

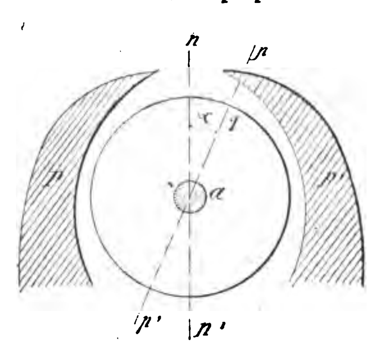


Fig. 51. — Décalage des balais.

Si, au contraire, on place les balais à l'intersection de $p.\ p'$ et du collecteur on aura le minimum d'étincelles aux balais et l'on recueillera le maximum de courant.

C'est donc sur p, p' que l'on devra placer les balais et l'on reconnaîtra que la position $p\,p'$ est atteinte à ce que les étincelles aux balais seront réduites à leur minimum.

L'angle $n.\ a.\ p. = \alpha$ varie avec le débit demandé à la machine. On devra donc, pendant le service, surveiller les étincelles pour rectifier la position des balais, s'il y a lieu.

Balais. — L'évaluation des dimensions de cet accessoire d'une dynamo n'est pas indifférente, car pas plus qu'un balai trop mince, un balai trop épais ne donne de bons résultats. Nous avons vu plus haut qu'aucune rè-

gle fixe ne permettait d'en déterminer les dimensions.

Toute question de dimensions mise à part, la nature des matières appliquées à cette construction et leur utilisation varient souvent d'un constructeur à l'autre, et nous ne retiendrons que les dispositions les plus généralement employées aujourd'hui.

Balais en fil métallique. — Des fils de cuivre droits, juxtaposés, sont soudés par l'une de leurs extrémités, et maintenus dans une gaîne métallique. Ils reposent à plat sur le collecteur (fig. 52).

La section du balai est rectangulaire.



Fig. 52. — Balai en fils métalliques.

Lorsque les fils de l'extrémité libre du balai s'écartent, on peut les ramener en entourant le balai d'une sorte de ceinture formée d'un ou deux fils tordus ensemble et bouclés *sur la face supérieure.*

Balais en peigne. — Ce genre de balais assez répandu en Amérique est employé de préférence aux autres avec les machines à courants redressés fig. 53.

Chaque balai est constitué par un assemblage de

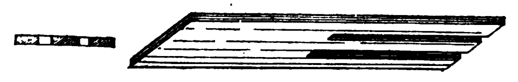


Fig. 53. — Balai en peigne.

longues lames de cuivre fendues suivant leur longueur afin d'assurer le contact sur plusieurs points du collecteur.

Le balai est appliqué tangentiellement au collecteur.

Balais en toile métallique. — Très employés, ces balais sont formés par une bande de toile métallique enroulée sur elle-même de façon à former un prisme rectangulaire, puis, comprimée et maintenue dans une bague (fig. 54).

Pour éviter l'effilochement et régulariser l'usure, la



Fig. 54. — Balai en toile métallique.

toile est enroulée obliquement.

Balais en charbon. — Préconisé par le professeur Forbes ce système est assez répandu.

Chaque balai est formé d'un bloc de charbon bon conducteur et de grain aussi fin que possible.

Le bloc porte sur le collecteur par l'une de ses bases taillée en biseau, soit normalement, soit obliquement.

Balais feuilletés. — Edison a fait des balais formés d'une série de lames superposées, soudées entre elles à l'une de leur extrémités (fig. 55).

Le balai porte sur le collecteur par l'une de ses extrémités taillée en biseau, les lames étant *placées de champ* ; d'autres balais ont été faits aussi par l'assemblage de

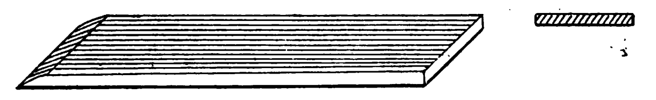


Fig. 55. — Balai feuilleté Edison.

lames métalliques, mais ils étaient posés à plat sur le collecteur.

Balai feuilleté Bordeaux. — Le balai est comme son nom l'indique, composé de feuilles de métal dont l'épaisseur n'est pas plus grande que celle du papier le plus mince. Les feuilles métalliques employées ont ordinairement 2 centièmes de millimètre d'épaisseur ; elles sont pliées ou plissées à la largeur du balai, en quantité nécessaire pour donner à celui-ci l'épaisseur demandée. Chaque millimètre de section contient de 40 à 50 feuilles, suivant la pression qui a été faite dans des matrices assez résistantes pour supporter un effort considérable.

Le balai feuilleté, ainsi constitué, possède deux avantages : 1° très grande conductibilité ; 2° douceur de frottement sur le collecteur.

La conductibilité du balai feuilleté est égale à celle du métal qui le constitue, d'ailleurs sa densité est très proche de celle d'une barre en même métal fondu. A ce point de vue aucun balai ne peut lui être comparé, si fine qu'une toile métallique soit tissée, les vides laissés par le tissage ont pour effet de donner au balai de toile un poids spécifique deux fois plus petit que celui du balai feuilleté. Au point de vue électrique, cette grande conductibilité a une importance primordiale, parce qu'elle permet de diminuer l'épaisseur des balais dans le rapport de 2 à 1.

La grande conductibilité des balais feuilletés, et par suite leur faible épaisseur permet de ne mettre certainement en court circuit que deux bobines de l'induit.

Il est utile d'insister sur la douceur de frottement exercée sur le collecteur par le balais feuilleté : cette propriété est

la conséquence du mode de construction, car en laminant le métal aussi mince que possible, on détruit les propriétés inhérentes au métal même.

L'assemblage de ces feuilles constitue une sorte de coussin métallique qui, tout en possédant la même conductibilité qu'une barre fondue de même section, annule le frottement qui résulterait de l'emploi d'un balai autrement composé. Le choix du métal n'est pas indifférent ; le cuivre en est la base principale. Allié au zinc ou au nickel, il peut donner des alliages ayant une malléabilité suffisante pour en permettre le laminage à deux centièmes de millimètre.

L'important est d'employer des métaux d'une grande pureté. Le laminage, à d'aussi faibles épaisseurs, présente certaines difficultés, et on est obligé, à partir du dixième de millimètre, de passer par dix ou douze laminages et recuits successifs pour obtenir l'épaisseur voulue, c'est d'ailleurs ce qui explique le prix élevé de la matière première.

Position des balais. — Suivant que les balais seront à application tangentielle, oblique ou à contre sens, leur position par rapport au collecteur sera différente.

Balais tangents. — Le balai doit dépasser (fig. 56) le collecteur de 4 à 5 millimètres et être suffisamment *relevé* pour ne pas porter sur plus de deux touches ou en accrocher les bords.

La fig. 56 indique cette disposition.

Fig. 56. — Position des balais tangents.

Balais obliques. — Ces balais reposent sur le collecteur par une extrémité taillée en biseau, généralement à 45° par rapport à leurs grandes

faces : il s'en suit que le balai est lui même incliné à 45° sur l'horizontale comme on peut le voir sur la fig. 57.

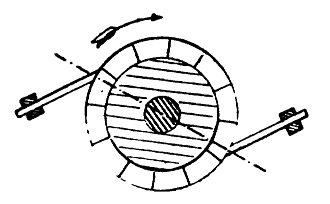


Fig. 57. — Position des balais obliques.

Balais à contre sens. — Cette disposition est spécialement adoptée pour les balais en charbon.

Au début, on les montait normalement au collecteur, et le bloc de charbon guidé par une coulisse portait sur les touches par l'une de ses bases.

Aujourd'hui on préfère les placer à contre sens du mouvement de rotation pour augmenter la pression sur le collecteur.

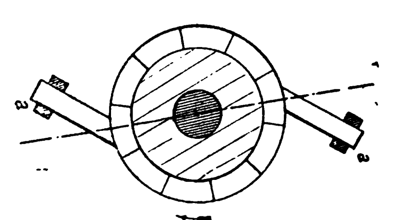


Fig. 58. — Position des balais à contre sens.

La fig. 58 montre cette disposition.

Généralement un ressort à boudins presse sur le bloc de charbon et assure son application sur la surface du collecteur.

Porte-balais. — On désigne sous cette dénomination l'ensemble des parties de la dynamo qui soutiennent les balais.

Les porte-balais, généralement montés sur le palier du côté du collecteur, doivent être soigneusement isolés du reste de la machine.

Au début, ce n'était qu'un simple ressort recourbé auquel on fixait le balai, mais depuis on a reconnu qu'une disposition aussi simple ne remplissait pas

les conditions voulues pour un bon fonctionnement.

Actuellement, si simples que soient les dispositions adoptées, les porte-balais sont toujours mobiles sur une circonférence concentrique à l'axe de rotation.

On a été amené à placer la gaine porte-balais sur un bras fixé à un collier métallique monté lui-même autour d'une couronne de porcelaine concentrique à l'arbre de rotation et fixée à demeure sur le palier de la machine. On arrête le collier, et partant les balais, dans une position déterminée, en agissant sur une clef dont la tige filetée traverse le collier et bute sur la couronne de porcelaine.

Les différents constructeurs ont plus ou moins modifié le détail de l'établissement des porte-balais et perfectionné cet organe en rendant possible des déplacements des balais dans différents sens, mais le principe de la construction reste toujours le même.

Porte-balais Siemens Halske. — Très répandu, ce système a l'avantage d'être simple et de rendre de bons services (fig. 59).

La gaine *g* du balai *b* est fixée à l'extrémité *r* d'un ressort formé de plusieurs lames de laiton écroui.

Le serrage du balai dans la gaine est obtenu par un clef *c*.

Le ressort est fixé lui-même sur un manchon *m* muni d'une poignée *p* ; ce manchon peut glisser le long d'un axe fixe *a*.

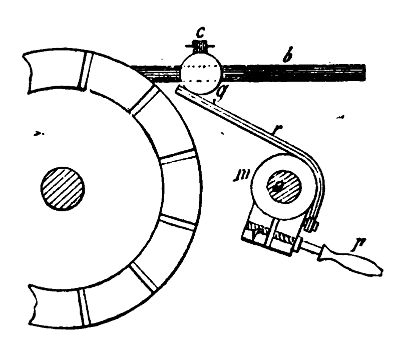


Fig. 59. — Porte-balais Siemens et Halske.

9*

Une vis de serrage *v* permet d'assurer la position de l'ensemble sous telle inclinaison que l'on veut.

Au moyen de cette disposition, on peut donc promener le balai le long du collecteur, et varier sa pression sur le collecteur en lui donnant une inclinaison plus ou moins grande.

L'axe qui supporte l'ensemble est mobile sur une circonférence concentrique au collecteur pour opérer le décalage, s'il y a lieu.

La maison Siemens applique ce dispositif sur toutes les machines y compris celle dont le collecteur est formé par l'induit lui-même.

Porte-balais Edison. — La gaine *g* est placée à l'extrémité d'un bras L solidaire d'un manchon M qui peut tourner autour de l'arbre *a* bien qu'il en soit isolé (fig. 60).

Cet arbre *a* porte un bras B dont l'extrémité libre taraudée reçoit une tige *t* filetée et à tête moletée.

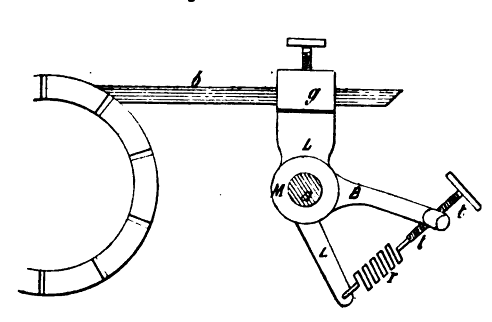


Fig. 60. — Porte-balais Edison.

Un ressort *r* réunit l'extrémité de la tige *t* au bras L et permet de presser plus ou moins le balai *b* sur le collecteur.

Porte-balais Thury. — Le dispositif adopté par M. Thury, bien qu'un peu compliqué, permet de modifier l'angle de décalage des balais en agissant simultanément

sur les balais positifs et les balais négatifs ; il permet en outre de régler séparément la pression sur le collecteur de chaque balai ou jeu de balais.

Les balais *b* sont montés dans des gaines *g* et serrés par des clefs *c* ; ces gaines sont fixées à l'extrémité des bras *l* mobiles autour des axes *a* ; des ressorts *r* tendent à presser les balais sur le collecteur C. Les bras l_1 sont

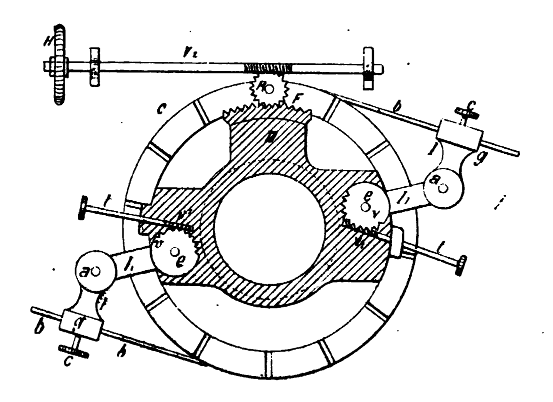


Fig. 61. — Porte-balais Thury.

mobiles autour des axes *e*; leur extrémité libre *v* est taillée circulairement et porte des dents d'engrenage.

Les axes *e* sont montés sur un collier D fixé à l'un des paliers de la machine dont il est soigneusement isolé.

Le collier D porte deux vis sans fin *t* dont la tête est moletée et dont l'extrémité libre v_1 est filetée et engrène avec *v*.

Il est muni en F d'un secteur denté engrenant par l'intermédiaire de la roue dentée R avec la vis sans fin V, que l'on manœuvre avec le volant H (fig. 61).

Le fonctionnement du porte-balai s'explique facilement.

Pour déplacer l'ensemble des balais sur le collecteur, soit en avant, soit en arrière, on agit sur le volant H, qui entraîne le collier et les porte-balais. On augmentera ou l'on diminuera la pression sur le collecteur en agissant sur les vis *t*.

Porte-balais extérieur Siemens-Halske. — La disposition suivante est appliquée aux machines dont le

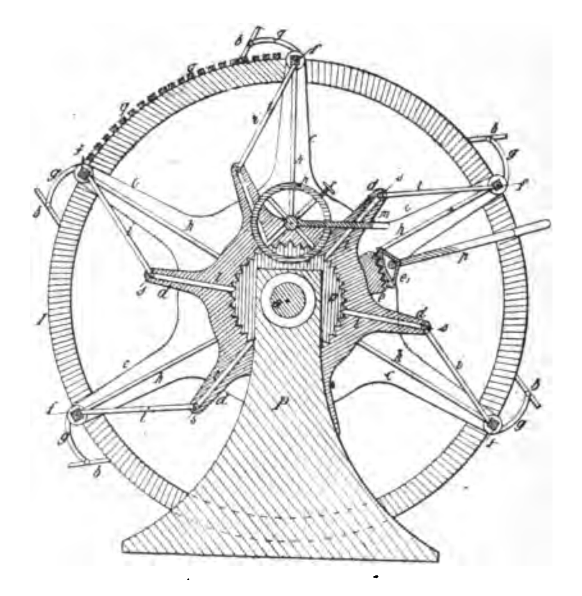


Fig. 62. — Porte-balais extérieur Siemens-Halske.

collecteur est formé, comme on l'a vu précédemment, par la surface extérieure de l'enroulement induit.

Dans la figure 62 :

I représente l'anneau induit à grand diamètre et faibles dimensions latérales ; sur une section seulement

les barres de cuivre *q*, partie intégrante de l'enroulement et faisant fonction de collecteur, sont représentées.

P un des paliers supportant l'arbre de rotation *a*.

b balais.

g gaines des balais. La gaine et son support sont les mêmes que dans le collecteur précité des mêmes constructeurs.

Les *porte-balais* proprement dits, au nombre de six, sont montés sur des bras *f* perpendiculaires au plan d'une étoile à six branches *c* dont ils sont isolés. Les rayons de l'étoile naissent d'une couronne circulaire mobile autour d'un manchon concentrique à *a*.

Le courant de chaque jeu de balais est amené à la borne correspondante de la machine par une barre *h* isolée de la masse.

Le déplacement de l'ensemble des balais en vue d'un décalage s'opère en agissant sur un levier *m*, qui, par l'intermédiaire de la roue dentée *o* et d'engrenages non figurés, entraîne dans son mouvement l'étoile à six branches *c*, et une autre étoile également à 6 branches mais de plus petit diamètre *d* montée aussi sur un manchon concentrique à *a*.

On fixe les balais dans la position définitive en calant l'étoile *c* par la clef de serrage *n*.

Le rôle de l'étoile *d* consiste à modifier la pression des balais sur le collecteur. A cet effet, les bras de levier *i* clavetés sur les bras *f* qui maintiennent les porte-balais peuvent coulisser sur des ergots *s* perpendiculaires au plan de l'étoile *d* et fixés à l'extrémité de chacun des bras *d* de la dite étoile.

Si, l'étoile *c* étant immobile, on fait tourner l'étoile *d*,

les bras *i* décrivent un arc de cercle et les balais seront soulevés ou abaissés suivant le sens du mouvement.

On commande le mouvement de l'étoile *d* par le levier *p* qui porte un secteur denté *l*, engrenant avec une roue dentée *e* qui agit directement sur l'étoile *d*.

MODES D'EXCITATION DES DYNAMOS A COURANT CONTINU

— Le courant nécessaire à l'excitation des inducteurs est généralement emprunté à la machine elle-même.

Lors de la mise en marche, le magnétisme rémanent du fer des électros produit un courant, faible il est vrai, dans l'induit : une partie de ce courant étant dérivée dans les inducteurs, augmente l'intensité du champ, et partant celle du courant débité par l'induit. Le phénomène se poursuit jusqu'à ce que la machine arrive à son débit normal.

La prise de courant sur l'induit qui alimente les inducteurs peut être différemment établie, et à chaque combinaison correspondent des propriétés différentes de la dynamo.

Nous allons passer ces différents cas en revue.

Excitation en série. — Ce cas est le plus simple à imaginer.

Le courant partant de l'un des balais suit le circuit extérieur, l'enroulement des électros et revient au second balai qui, par l'induit, est en communication avec le premier.

Ces machines sont destinées à produire un courant *d'intensité constante* quelle que soit la différence de potentiel aux bornes. Celle-ci est variable, elle prend des valeurs différentes suivant les besoins du circuit.

Elle conviennent à une *distribution en série,* comme c'est souvent le cas dans l'éclairage par lampes à arc.

On aide à la régulation du champ inducteur, et par suite du courant, par l'interposition d'un rhéostat sur le circuit.

Les machines de cette catégorie ne s'amorcent qu'autant que la résistance du circuit extérieur est inférieure à un certain maximum.

Excitation en dérivation ou shunt. — L'enroulement des inducteurs, dans ce second cas, est monté en *dérivation* sur les balais ou, ce qui revient au même, sur les bornes de la machine.

Le courant, au départ, se subdivise en deux fractions, l'une qui alimente le circuit extérieur, et la seconde qui traverse successivement les enroulements des inducteurs. Les deux courants se rejoignent au second balai et vont dans l'induit.

Si la dérivation au lieu d'être prise sur les bornes de la machine est prise sur le circuit extérieur, à une certaine distance, l'excitation est dite en longue *dérivation* par opposition à la précédente qui est aussi appelée en *courte dérivation.* Cette dernière est la plus employée.

Les machines shunt fournissent, à l'inverse des précédentes, un courant *d'intensité variable,* sous une *différence de potentiel constante,* mais seulement entre des limites très étroites. Elles conviennent pour les distributions en dérivation, l'éclairage par incandescence, la charge des accumulateurs.

La régulation du champ s'obtient à l'aide d'un rhéostat placé sur la dérivation qui alimente les inducteurs.

Les inducteurs sont enroulés de fil fin dont le grand

nombre de tours compense la faible valeur du courant d'excitation.

La polarité des inducteurs ne peut être renversée par un excès de force contre électromotrice, comme il peut arriver avec des dynamos série.

Ces machines ne s'amorcent qu'autant que la résistance du circuit extérieur est très élevée, ce que l'on peut réaliser en excitant la machine en circuit ouvert.

Excitation Compound ou Hypercompound. — Ce mode d'excitation permet d'obtenir un courant *d'intensité variable* sous une *différence de potentiel constante.*

Cette dernière condition est réalisée si l'on ne considère que la variation du nombre de récepteurs en service, mais elle exige que la vitesse de la machine soit aussi constante que possible.

Comme on le voit par la figure ci-dessus, l'enroulement des inducteurs est formé de deux circuits, l'un en série comme dans le premier mode d'excitation, et le deuxième en dérivation comme dans une machine shunt.

Ces enroulements ayant des effets opposés sur le champ magnétique, il en résulte que toute variation de débit du circuit extérieur n'entraîne *théoriquement* aucune fluctuation dans la valeur des *ampères-tours.* Le champ inducteur conserve donc une valeur constante.

Ces machines, très employées parce qu'elles nécessitent moins de surveillance que les machines shunt, conviennent pour les distributions en dérivation.

Comme dans le cas précédent, un rhéostat de réglage est monté sur l'enroulement shunt.

COUPLAGE DES DYNAMOS A COURANT CONTINU

Les dynamos peuvent être couplées en *série* ou en *quantité*, comme des générateurs chimiques, piles accumulateurs, etc.

Le couplage en *série* de deux dynamos s'obtient schématiquement en réunissant la borne + de l'une à la borne — de l'autre et en prenant le circuit extérieur sur les deux pôles, + et — restés libres.

Le couplage en *quantité* comporte au contraire la réunion entre eux des 2 pôles + d'une part, et des 2 pôles — d'autre part. Le circuit extérieur a pour origine les deux groupes de pôles l'un + et l'autre — ainsi constitués.

Il est inutile d'insister sur les services que peut rendre le couplage de deux machines ; et cependant donnons un exemple.

Une seule machine peut assurer le service sur un réseau à potentiel constant, pendant certaines heures de la journée. A d'autres heures au contraire, le soir par exemple, une puissance double devient nécessaire. Et au lieu d'avoir une seule dynamo dont la puissance correspond au maximum de consommation, on aura deux machines que l'on couplera en quantité le moment venu. A tous égards cette solution est plus économique que la précédente.

Couplage en série. — L'association en série de n dynamos aura pour résultat de laisser *constante* l'intensité du courant sur le circuit extérieur, mais de multiplier par n la différence de potentiel aux bornes, dans le cas où les n machines seraient identiques entre elles.

Si la force électromotrice n'est pas la même pour toutes les machines, la force électromotrice finale sera une moyenne.

En pratique ce mode d'association ne peut être appliqué à plus de 3 ou 4 machines.

Exemples. Quelles seront les constantes du courant fourni par le couplage en série de deux dynamos donnant chacune 10 ampères sous 100 volts?

Réponse — 10 ampères sous $100 \times 2 = 200$ volts.

— Même question : les machines donnant l'une 10 ampères sous 100 volts et l'autre 10 ampères sous 110 volts?

Réponse. — 10 ampères sous $\frac{100 + 110}{2} = 105$ volts.

Le mode opératoire pour le groupement des dynamos étant différent suivant que la machine est excitée en série, en dérivation ou en compound, nous examinerons successivement chacun de ces cas.

Dynamos série. Il suffit de relier la borne + de l'une à la borne — de l'autre et de brancher le circuit extérieur sur les deux pôles libres.

Il ne faut pas coupler en série des dynamos donnant des intensités très différentes, on risquerait de brûler l'induit de la plus faible.

Dynamos en dérivation. Le procédé ci-dessus ne peut être appliqué à deux machines de cette catégorie ; on est forcé de recourir à l'artifice suivant.

On réunit le balai + d'une machine au balai — de l'autre, puis le bout *finissant* de la dérivation d'excitation de la première machine au bout *commençant* de la dérivation d'excitation de la seconde, de telle

sorte qu'un même courant excite les inducteurs des deux machines.

Cette disposition est représentée figure 63, où D. D' représentent les deux dynamos C. C. C. le circuit extérieur et E. E_1 les enroulements inducteurs.

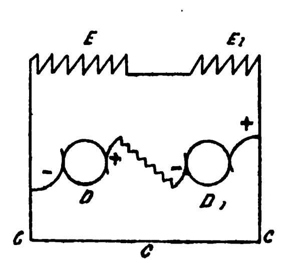


Fig. 63. — Couplage en série de deux dynamos Shunt.

Le circuit extérieur est pris sur les deux balais extrêmes.

Dynamos compound. — Le mode d'association procède des deux dispositifs indiqués ci-dessus.

On relie la borne + de l'une à la borne — de l'autre machine,et l'on branche le circuit extérieur sur les deux balais libres. Les enroulements inducteurs *série* se trouvent de la sorte montés en série et placés l'un entre les deux dynamos et le second entre une des dynamos et le circuit principal.

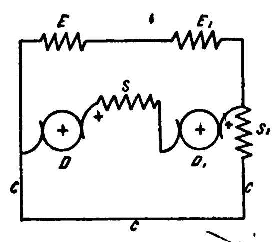


Fig. 64. — Couplage en série de deux dynamos compound.

Les deux enroulements inducteurs en dérivation sont ensuite montés en série.

La figure 64 montre la disposition de ces divers circuits :

D. D_1 Dynamos.
C. C. C. Circuit extérieur.
S. S_1 Enroulements inducteurs en série.
E. E_1 Enroulements inducteurs en dérivation.

Couplage en dérivation. — Le but de l'association de

dynamos en dérivation est de produire un courant plus intense, la différence de potentiel restant constante.

On peut grouper en quantité un nombre quelconque de dynamos même dissemblables comme puissance : autant que possible elle devront développer même force électromotrice, mais une différence même notable n'est plus un obstacle au groupement des machines, chacune d'elles travaillant pour son propre compte et apportant sa part contributive à la puissance totale développée.

Voici les dispositions à prendre suivant le mode d'excitation des machines.

Dynamos série. — Deux machines de cette catégorie ne peuvent être couplées en quantité par la simple réunion entre eux de leurs balais + d'une part, et de leurs

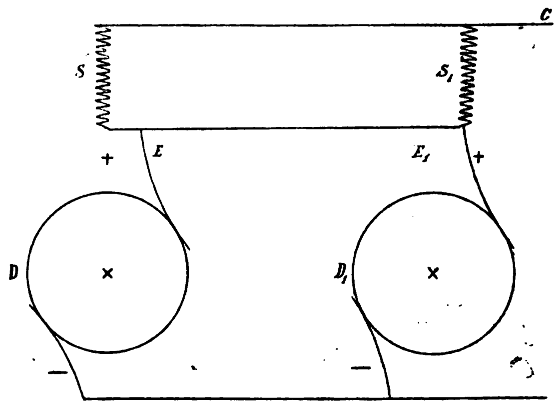


Fig. 65. — Couplage en quantité de deux dynamos série.

balais — d'autre part, qu'à la condition qu'elles soient identiques et qu'elles tournent à la même vitesse.

Si l'une ou l'autre de ces conditions n'était pas réalisée, il arriverait que celle qui produit la puissance la plus

grande agirait comme génératrice et la seconde comme réceptrice. La polarité de cette dernière se trouverait renversée.

Pour parer à cet inconvénient, on réunit les balais de même nom entre eux, et l'on établit, en plus, entre les balais + une liaison par un fil *d'équilibre*.

La figure 65 montre les dispositions particulières à ce mode de couplage.

Soient : D. D_1 les dynamos.

C. C. C. le circuit extérieur.

S. S_1 les enroulements inducteurs en série.

E. E_1 le fil d'équilibre.

Si les deux machines fournissent la même puissance, aucun courant ne passera par E E_1 ; dans le cas contraire, le fil d'équilibre sera traversé par une partie du courant engendré par la machine la plus puissante, courant qui servira à exister les inducteurs de la machine la plus faible.

Dynamo en dérivation. — Cette opération se fait chaque jour couramment : elle consiste à relier aux bornes du circuit extérieur comme l'indique la figure 66

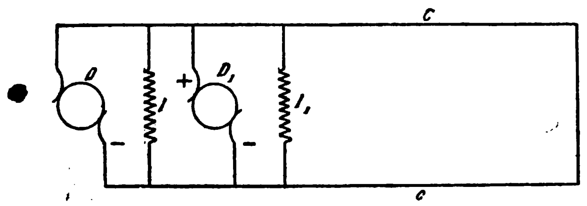


Fig. 66. — Schéma du couplage en quantité de deux dynamos Shunt.

1° les balais positifs — 2° les balais négatifs — 3° les deux fils de dérivation des inducteurs.

Comme dans les figures ci-dessus :

D. D_1 représentent les dynamos.
C. C. C. le circuit extérieur.
I. I_1 les enroulements inducteurs en dérivation.

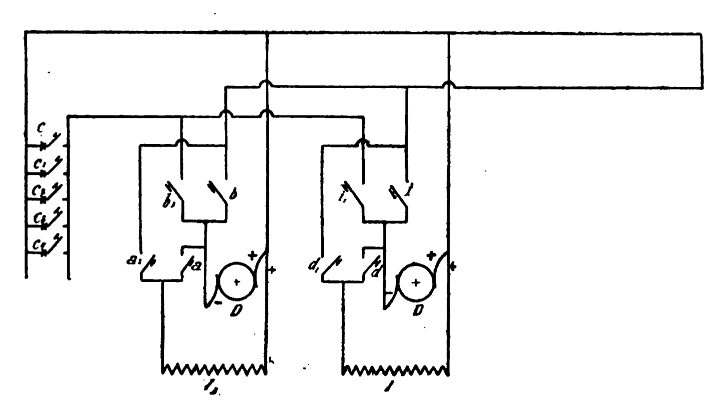


Fig. 67. — Couplage en dérivation de deux dynamos Shunt.

Si les machines doivent être mises en marche simultanément ,il n'y a point à prendre de précautions particulières ; si au contraire, on doit coupler à une machine en service une dynamo jusqu'alors inactive (fig.67),il faut que, au préalable, ses inducteurs soient excités et qu'elle tourne en pleine vitesse avant que la connexion de son induit avec le circuit extérieur ne soit effectuée.

Faute de prendre cette précaution, le courant pénètre à contre-sens dans l'induit et tend à le faire tourner en sens contraire.

Pour réaliser cette condition, chaque enroulement inducteur doit être muni d'un interrupteur à deux manettes indépendantes : a. a_1.

La machine D étant en marche, pour coupler la seconde D_1 on ferme d'abord a_1 ; le courant du réseau passe par les enroulements en dérivation I_1. Puis, D_1 ayant acquis sa vitesse de régime, on ferme b_1, puis les interrupteurs c. c_1 d'un tableau de résistance placé à l'usine et formé par des groupes de lampes à incandescence.

Dès que D_1 débite son courant normal on ferme a, puis b et l'on ouvre a_1 et b_1 et c. c_1 ; la dynamo se trouve ainsi montée sur le circuit extérieur.

Pour retirer D_1 du circuit on opérerait les mêmes manœuvres, mais en ordre inverse.

La figure 67 facilite la compréhension de ces combinaisons.

Quand D était seule en service, les interrupteurs d et i étaient fermés tandis que d_1 et i_1 étaient fermés.

Dynamos compound. — L'association en quantité de machines en quantité est assez délicat, car si l'une des machines vient à développer plus de puissance que la seconde, celle-ci tend à se comporter comme une réceptrice.

On a été conduit, pour éviter cet inconvénient, à emprunter le *fil d'équilibre* aux dynamos série couplées en quantité, et l'on obtient ainsi des résultats assez satisfaisants, quand bien même la force mécanique d'entraînement sur les poulies motrices ne serait pas la même pour les deux machines, et si les dynamos étaient dissemblables entre elles et tournaient à des vitesses différentes.

La figure 68 montre les liaisons des divers éléments : les enroulements série S. S′ partent des balais + et aboutissent à l'un des câbles du circuit extérieur. Un fil d'équilibre EE_1 réunit les balais positifs.

Les enroulements en dérivation $I. I_1$ partent des ba-

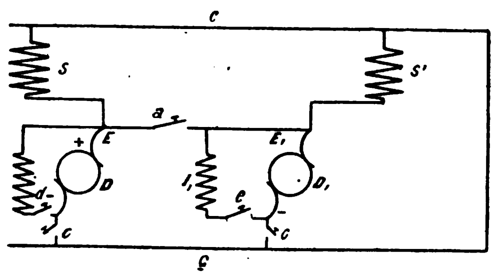


Fig. 68. — Couplage en quantité de deux dynamos compound.

lais — et se relient au fil d'équilibre qui doit avoir une section égale à celle des conducteurs extérieurs.

Les balais négatifs sont en communication avec l'autre conducteur du circuit extérieur.

Chaque machine doit être munie d'un interrupteur entre le balai — et le circuit extérieur. En outre, chaque enroulement inducteur en dérivation et le fil d'équilibre doivent avoir chacun aussi un interrupteur.

Si l'on suppose la dynamo D seule en service, ses interrupteurs *c.* et *d* seront fermés ; pour mettre en circuit la machine D_1 on devra, dans l'ordre suivant, imprimer à D_1 sa vitesse de régime, puis fermer l'interrupteur *e*, l'interrupteur *b* et enfin l'interrupteur *a*.

Pour retirer D_1 du circuit il faudrait faire les mêmes manœuvres, mais en *ordre inverse* : ouvrir successivement *m. b. e.* et arrêter la machine.

RENDEMENT DES DYNAMOS A COURANT CONTINU

Les constructeurs ayant l'habitude d'accompagner sur leurs catalogues l'exposé des constantes de leurs ma-

chines de l'indication du *rendement*, il est utile à l'acquéreur de connaître exactement la signification des termes employés.

Les pertes d'énergie *dans la dynamo* sont de deux natures :

1. — Les *Pertes mécaniques* dues au frottement de l'arbre sur les paliers.

2. — *Pertes électriques* dues à l'échauffement des circuits, à l'hystérésis, aux courants de Foucault, etc.

Désignons par :

P_m la puissance mécanique dépensée sur l'arbre du générateur, mesurée au dynamomètre de transmission, au frein de Prony ou autrement,

P_t la puissance électrique totale développée.

P_u — — utilisable.

Le *Rendement électrique* η sera représenté par $\frac{P_u}{P_t}$.

Le *Rendement industriel ou commercial* ηi par $\frac{P_u}{P_m}$

et le *Coefficient de transformation* par $\frac{P_t}{P_m}$.

L'acquéreur doit se préoccuper du *Rendement industriel*, le seul qui l'intéresse, puisqu'il représente le rapport entre la force développée par le moteur et la puissance utilisable sous forme d'énergie électrique.

La mesure du *Rendement industriel* peut se faire de la manière suivante : on intercale un dynamomètre de transmission entre la poulie de la dynamo et celle du moteur et à des intervalles de temps réguliers on mesure la vitesse du moteur : cet élément combiné à l'indication du dynamomètre donne la puissance motrice four-

nie à la dynamo. Aux mêmes instants, on mesure la différence de potentiel e aux bornes et l'intensité i du courant.

Le rapport :

$$\frac{e.i}{P_m} = \eta i$$

La première mesure ne devra être faite qu'après que les circuits de la dynamo auront pris leur température finale, soit après 2 heures environ de marche ininterrompue.

On fera bien aussi de faire ces mesures entre les limites extrêmes de marche normale.

Le *Rendement industriel* atteint 94 pour cent dans les machines construites avec précision, et seulement 80 à 85 pour cent dans les machines *bon marché*.

Le *Rendement industriel* est toujours inférieur au *Rendement électrique* : ainsi une machine de très bonne construction pourra donner les résultats suivants :

Rendement industriel	93,5 pour cent
Rendement électrique	95,6 —

Accidents aux Dynamos et leurs remèdes

ACCIDENTS A L'INDUIT. — Si, par suite d'un excès de vitesse du moteur ou de la mise en circuit d'un trop grand nombre de lampes, la dynamo débite un courant d'une intensité supérieure à celle du régime normal, les bobines induites s'échauffent et leur température peut s'élever au point de détruire la couche isolante qui recouvre les fils.

Il se produit alors un court circuit entre des spires voisines.

Hormis le cas précité, il est rare qu'un induit brûle tout entier ; l'accident n'atteint généralement que quelques-unes des spires. Il en est autrement quand il s'agit d'un moteur qui peut être *calé* au moment du démarrage.

L'échauffement anormal des fils est généralement accompagné du dégagement d'une odeur de roussi qui, souvent, prévient à temps de ce qui se passe pour que l'on ait le temps de débrayer avant la formation du court circuit.

Mais, il arrive souvent aussi que le court circuit est produit avant la destruction par *la chaleur* de la couche isolante, comme c'est le cas ensuite d'un *accident mécanique* : on ne s'apercevra du court circuit que trop tard pour remédier à la destruction d'une ou plusieurs bobines de l'induit.

Dans tous les cas, un court circuit dans l'induit est accompagné d'une élévation de la température des spires défectueuses et de la production d'étincelles aux balais.

La formation du court circuit peut être due à un accident au collecteur ou à l'induit lui-même. Nous allons examiner ces deux cas :

— L'introduction de poussières métalliques entre deux lames du collecteur peut suffire à former une liaison entre elles.

— Il en sera de même si un arc jaillit entre le collecteur et les balais : des gouttelettes de métal fondu peuvent former un pont entre deux touches.

— Dans l'un et l'autre cas, un courant d'intensité

anormale prend naissance et les bobines correspondantes aux touches réunies sont compromises.

— On remédiera à cet accident en nettoyant le collecteur et en détruisant à la lime les liaisons existantes.

Des causes de nature très diverse peuvent produire un court circuit daus l'induit :

— Tout d'abord un choc, un frottement brusque contre un outil peuvent détruire l'isolement de deux fils voisins.

— Si les paliers sont en un métal tendre, comme le métal antifriction, l'usure amène une descente de l'axe de rotation et il arrive un moment où la surface extérieure de l'induit frotte contre les pièces polaires.

— Des frottements qui, à la longue, font tomber l'isolant, se produisent parfois entre les couches superposées des enroulements de l'induit.

— La superposition de spires traversées par des courants à des potentiels très différents, disposition à peu près abandonnée aujourd'hui, donne lieu fréquemment à des courts circuits entre elles.

— Un défaut dans la couche isolante qui recouvre un fil appliqué sur une partie de la masse.

— La carbonisation de la couche isolante résultant de l'échauffement exagéré du noyau magnétique de l'induit insuffisamment subdivisé, ou des défauts d'isolement entre les sections.

— L'emploi d'un isolant hygrométrique qui se contracte sous l'influence de la chaleur, lors de la mise en marche, et peut s'écailler.

— Le desserrage des tôles du noyau magnétique et le frottement qui en résulte entre leurs bords et les fils de l'induit.

Disjonction dans l'induit. — Une disjonction peut se produire entre le fil de connexion d'une bobine de l'induit et la touche correspondante du collecteur.

Cet accident se décèle par la production d'étincelles aux balais, que l'on ne peut réduire par le déplacement de ces derniers, et l'aspect particulier que prennent une ou plusieurs touches du collecteur qui semblent brûlées sur les bords..

Pour localiser le défaut, on fait tourner la machine pendant quelques minutes. On touche à la main les fils qui relient les sections de l'induit aux touches du collecteur ; ceux qui présentent une température anormale sont partiellement disconnectés.

Rupture des connecteurs. — Ces pièces qui sont traversées par des courants très intenses, renversés deux fois par tour, sont soumises à des efforts latéraux qui peuvent finir par les rompre.

Lorsqu'un pareil accident se produit, il faut remplacer le connecteur détérioré par une pièce plus forte que l'on dispose autant que possible en dehors de l'épanouissement du champ.

Accidents aux inducteurs. — Des accidents de deux natures différentes peuvent se produire dans les inducteurs.

Rupture d'une spire. — La flexibilité des carcasses des bobines ou l'absence de jonction entre leurs bords peuvent, sous l'influence des vibrations, amener la rupture des premières spires, dans les couches directement en contact avec la carcasse.

Cet accident se décèle de lui-même par la non excitation de la dynamo.

Court circuit. — Si la bobine, siège du court circuit,

est en série avec les autres bobines, elle restera froide dans la partie défectueuse alors que les autres spires s'échaufferont.

Si, au contraire, la bobine défectueuse est en dérivation, il se produira un échauffement dangereux au point du court circuit.

Causes passagères d'accidents. — L'absence de production de courant ou la formation d'étincelles aux balais proviennent souvent d'une cause accidentelle à laquelle il est facile de remédier.

— Le desserrage d'une vis peut s'opposer à l'excitation de la machine ou donner naissance, par le contact du fil qu'elle maintenait avec une autre pièce, à un court circuit.

— Une couche de vernis appliquée par inadvertance sous la tête d'une vis suffit à couper le circuit et à s'opposer à la production du courant.

Il y aura de même absence de courant pour une dynamo shunt si un court circuit existe sur les conducteurs principaux, et pour une dynamo série, si le circuit principal est ouvert.

— Un graissage surabondant des paliers peut amener des projections d'huile, tant sur les spires de l'induit que sur le collecteur. Dans le premier cas, l'isolant des fils se détruira et provoquera un court circuit dans l'induit ; dans le second, l'huile se carbonisera sous l'action des étincelles des balais et un dépôt charbonneux, conducteur, se produira entre les touches.

Ce dernier accident se manifestera surtout si les touches sont isolées entre elles à l'amiante ou au papier.

Accidents au collecteur. *Faux Rond.* — Une ou plusieurs touches du collecteur peuvent s'user au point de

se trouver au-dessous du niveau de la surface cylindrique enveloppe de ce dernier.

La cause peut en être l'emploi pour la fabrication des dites touches d'un cuivre plus doux que pour les autres, mais elle résulte le plus souvent de la flexibilité de l'arbre de rotation construit trop faible.

Dans ce dernier cas, on constate que l'arbre vibre périodiquement dans un plan passant par son axe théorique ; ces vibrations périodiques font faire des resauts aux balais et jaillir des étincelles entre eux et des points du collecteur toujours les mêmes.

Ces étincelles finissent par produire un méplat sur le collecteur.

Il en sera de même, si elles ont pour origine une disjonction partielle entre l'induit et la ou les touches considérées du collecteur.

Remèdes aux accidents précités. — Après avoir indiqué les sièges variés soit de rupture des connexions et des spires, soit des courts circuits, accidents que l'on peut déceler et localiser à l'aide d'une pile et d'un galvanomètre, il nous reste à indiquer les moyens d'y remédier.

Court circuit dans les inducteurs. — On défait toutes les connexions des bobines, et l'on met hors circuit celle qui est défectueuse.

Pour compenser la diminution de l'excitation on imprimera à la machine une allure plus rapide.

Court circuit au collecteur. — Un nettoyage convenable permet d'enlever les poussières métalliques ou charbonneuses qui ont pu se loger entre deux touches.

Si le corps étranger est trop résistant, comme c'est le cas pour une goutte de soudure, on emploie la lime et

l'on a soin d'adoucir les parties limées au papier de verre et d'abattre les arêtes des touches.

Court circuit dans l'induit. — Si la bobine est enroulée en tambour il est à peu près impossible d'effectuer la réparation sur place, et l'on est forcé d'arrêter et de monter un induit neuf.

Si l'enroulement est en anneau la réparation sur place est possible et l'on peut marcher à nouveau jusqu'à ce que l'on ait pu se procurer un induit de rechange pour le temps que l'on mettra à réparer complètement l'accident. Mais il va de soi que le court circuit ne devra intéresser qu'une ou deux bobines : dans le cas contraire, on se trouvera forcé d'arrêter jusqu'à ce que l'on ait un induit neuf.

On détachera les connecteurs qui relient les bobines élémentaires aux touches du collecteur et à l'aide de la pile et du galvanomètre on déterminera si le court circuit existe entre les bobines et la masse ou entre des spires seulement.

Si le court circuit existe entre des spires et la masse de la dynamo on met les bobines correspondantes hors circuit, en reliant leurs extrémités entre elles, et pour assurer la continuité du circuit des parties saines, on réunit les lames correspondantes du collecteur entre elles et avec les voisines avec une cale de cuivre.

On rétablit la liaison des bobines saines avec les touches correspondantes, et l'on peut marcher à nouveau, pendant un certain temps, sans inconvénient, malgré l'échauffement qui se produit.

On agira de même si le court circuit existe entre des spires voisines.

Rupture d'un fil de l'induit. — La réparation sur place n'est possible que si l'enroulement est en anneau.

La bobine défectueuse déterminée, on enlève l'induit et son arbre, et l'on déroule les spires, siège du défaut.

On réunit les deux extrémités du fil rompu à l'aide, soit d'une goutte de soudure, soit d'un bout de fil soudé aux deux tronçons de la spire. On aura soin de faire ces soudures à la résine et non à l'acide.

La partie nue du fil sera entourée de toile isolante au caoutchouc ou au goudron.

Si la partie du fil à remplacer présente une certaine longueur, on devra tenir compte de ce que le fil additionnel peut n'avoir pas exactement le même diamètre que l'ancien, enveloppe comprise, et modifier en conséquence le nombre de couches à enrouler.

Généralement le nouveau fil aura un diamètre supérieur à celui qu'il remplace.

Rupture d'un fil des inducteurs. — Quand le fil est enroulé sur des carcasses mobiles formant autant de bobines distinctes, on enlève complètement la bobine défectueuse, et l'on continue à marcher, en forçant la vitesse de la machine.

On déroule ensuite la bobine enlevée, on répare la rupture, et l'on replace la dite bobine sur l'inducteur.

Si le fil est directement enroulé sur le noyau des inducteurs, on n'a pas la ressource de réparer en marche.

Pour dérouler le fil, on place sur un tour la carcasse de la bobine ou le noyau inducteur, et au fur à mesure que l'on dévide, on enroule le fil sur un mandrin. La réparation effectuée on remet le fil à sa place en le tendant avec soin.

L'emploi du mandrin évite les bouclages du fil toujours

dangereux, surtout pour l'isolant, et quelquefois même pour le métal du conducteur.

Dans le cas où le fil devra reposer directement sur le noyau de l'inducteur, on devra s'assurer que l'isolement est bon entre le fil et la masse.

Abaissement de l'axe de rotation. — On peut remédier à l'usure d'un palier en métal genre antifriction, en mettant du métal dans la coquille du palier.

Si celui-ci est en bronze le remplacement est indispensable.

Faux rond, usure du collecteur. — Lorsqu'un méplat peu important s'est formé, on peut adoucir à la lime les parties voisines. S'il est très prononcé on devra *tourner* à nouveau le collecteur.

Le frottement des balais amène souvent une usure profonde des parties du collecteur en contact avec eux.

Il en résulte la production des sillons profonds.

On peut répartir l'usure du collecteur sur toute sa longueur, en déplaçant les balais parallèlement à eux-mêmes, et en les faisant porter successivement sur tous les points du collecteur.

A l'existence de ces sillons on ne peut remédier qu'en mettant le collecteur sur le tour.

A cet effet on enlève l'induit et son arbre que l'on fixe sur un tour et l'on chariotte avec un outil fin, afin de ne pas trop tirer sur le cuivre.

La surface extérieure est ensuite polie avec soin à la toile d'émeri fine, et l'on s'assure qu'aucune lame des isolants intercalés entre les touches ne dépasse la surface extérieure ou n'est rabattue.

Trépidations, vibrations. — D'une façon générale,

une dynamo à courant continu doit être *silencieuse.*

S'il n'en est pas ainsi c'est que, ou bien elle est mal équilibrée par défaut de construction, ou qu'elle est assujettie d'une façon défectueuse sur son bâti.

On reconnaîtra la première cause en enlevant l'induit avec son arbre, et en le faisant reposer par les extrémités de ce dernier sur deux poutres horizontales.

Si l'induit est mal équilibré, l'ensemble poussé à la main roulera par saccade et tendra à s'arrêter, en laissant au point le plus bas la même partie de l'ensemble. S'il est bien équilibré, l'induit roulera d'une façon régulière et s'arrêtera dans une position quelconque.

Les vibrations d'une dynamo bien équilibrée ne peuvent être attribuées qu'à un assujettissement défectueux de la machine sur son bâti, défaut auquel il est facile de remédier.

Les trépidations ont pour conséquence d'amener des resauts des balais, d'où production d'étincelles, et de fatiguer les isolants des fils qui arrivent à tomber en poussière.

Si la cause en est le manque de symétrie de l'induit, la réparation ne peut être faite que par le constructeur.

Il en sera de même si les ondulations du courant proviennent de ce que le moteur a une vitesse irrégulière.

Si la variation de vitesse provient d'un glissement de la courroie on devra tendre celle-ci ou agir sur la glissière de la dynamo.

Il est quelquefois possible de tourner le collecteur sans enlever l'induit : à cet effet on fixe sur le bâti de la machine une solide pièce de bois et l'on y boulonne un petit chariot de tour.

On fait tourner la machine à la main, doucement et sans secousses, pendant que l'outil de tour travaille par passes très légères. On polit ensuite.

Généralement on ne tourne le collecteur que jusqu'à 1 centimètre de l'induit.

Il faut avoir soin de bien nettoyer le collecteur, les connecteurs et la surface extérieure de l'induit, pour enlever les poussières métalliques, d'abord avec une brosse puis avec un soufflet.

Ondulations du courant. — Si le moteur ne tourne pas d'une façon régulière, si la poulie qui supporte la courroie de commande ne tourne pas rond, si la tension n'est pas suffisante, la force électromotrice varie soit périodiquement, soit d'une façon irrégulière et il en résulte des soubresauts dans l'éclat des lampes.

La dynamo ne produit pas de courant. — Assez fréquemment il se produit qu'à la mise en route la dynamo ne donne pas de courant. La cause pouvant être différente suivant le mode d'excitation de la machine, il convient d'examiner pour chaque cas les raisons qui s'opposent à la production de la force électromotrice.

Dynamo excitée en série. — Comme première cause, il convient de citer l'insuffisance de magnétisme rémanent des noyaux inducteurs : le courant induit engendré est alors trop faible pour permettre à la machine de s'amorcer.

On y remédie en mettant la machine en marche et en mettant l'induit en court circuit à l'aide d'un fil qui va d'un balai à l'autre. On fera bien de ne *fixer* le fil qu'à un seul balai et de l'appliquer à la main sur le second,

parce qu'au moment où l'amorçage se produira, des étincelles violentes naîtront entre les balais et le collecteur.

Pour une vitesse donnée, la résistance extérieure ne devant pas dépasser une certaine limite pour que l'amorçage puisse se produire, il y aura donc lieu de vérifier l'état du circuit extérieur et d'en retirer des résistances, soit appareils récepteurs, soit résistances de rhéostat.

La machine peut aussi se désamorcer pendant le service si la résistance du circuit extérieur dépasse sa valeur maxima. Le remède s'indique de lui-même, retirer des résistances du rhéostat de réglage ou des récepteurs.

Dynamo excitée en dérivation. — De même que dans le cas précédent, le magnétisme rémanent des inducteurs peut, s'il est trop faible, s'opposer à l'amorçage.

L'état du circuit extérieur peut être aussi cause de l'anomalie : si tous les appareils récepteurs sont en circuit et toutes les spires du rhéostat sur les inducteurs.

Il convient d'ouvrir le circuit extérieur, de retirer les résistances du rhéostat d'excitation et de mettre la machine en marche : la machine fonctionne alors comme une dynamo série.

Si, en marche, la résistance du circuit extérieur tombe en-dessous de sa valeur minima, la machine se désamorce et force est de retirer du circuit un nombre convenable d'appareils récepteurs.

CHAPITRE V

MISE EN MARCHE. ARRÊT. ENTRETIEN DES DYNAMOS

Mise en marche de la dynamo. — Chaque jour, avant l'heure de la mise en marche, on doit passer en revue les parties principales de la machine et s'assurer de leur bon état :

1. — Contrôler le serrage des vis et bornes de prises de courant tant sur les conducteurs principaux que sur les fils de connexion.

2. — Remplir les graisseurs d'huile, vérifier si la matière lubrifiante s'écoule facilement, mais toutefois sans excès pour éviter des projections toujours nuisibles, tant sur le collecteur que sur l'induit.

3. — Nettoyer le collecteur et les connecteurs de l'induit avec une brosse dure en poils de porc.

4. Souffler sur l'induit et notamment entre ses connecteurs avec un soufflet terminé par un tube de caoutchouc pour éviter les chocs possibles du bout métallique du soufflet sur l'isolant des fils.

5. — Vérifier la taille des balais, au besoin les recouper, et s'ils sont en fils de cuivre s'assurer que la botte est bien compacte ; dans le cas contraire, resserrer les fils divergents en prenant la botte dans une ou plusieurs ceintures faites chacune d'un ou plusieurs fils : les fils doivent être assujettis par torsion, sur la face supérieure du balai.

6. — Contrôler le serrage des balais dans leur gaine, serrage qui doit être parfait.

7. — S'assurer que le ressort qui règle la pression des balais sur le collecteur fonctionne librement; cette pression doit être légère, et les balais doivent porter sur le collecteur par toute leur surface.

8. — Rechercher s'il ne s'est pas logé de poussière entre les parties frottantes des porte-balais ; dans le cas contraire, il pourrait se produire des dérivations du courant principal.

9. — Les balais dans une machine bipolaire doivent porter sur deux points diamétralement opposés du collecteur, position que l'on peut vérifier en comptant le nombre de touches compris entre les deux balais qui doit être la moitié du nombre total des touches du collecteur.

Dans une machine à quatre pôles, le nombre de touches compris entre les balais sera le quart du nombre total de touches.

Il sera facile de repérer la position des balais si, comme beaucoup de constructeurs le font aujourd'hui, touches du collecteur espacées de la quantité voulue sont marquées d'un coup de pointeau.

10. — Il est prudent de garder les balais soulevés au moyen de cales de bois, pour éviter un rebroussement possible si le moteur vient à tourner à contre sens.

Toutes ces précautions ayant été observées et le commutateur principal étant ouvert, on met le moteur en marche et on embraye la dynamo.

On met les balais sur le collecteur en enlevant les cales de bois et quand la vitesse de régime est atteinte, on ferme le circuit extérieur et l'on met successivement en circuit les divers groupes de lampes.

Si la dynamo est excitée en dérivation, elle a eu le temps de s'amorcer avant que l'on ferme le circuit extérieur.

Si le circuit extérieur alimente de lampes à incandescence il est indispensable de vérifier le voltage sous peine de courir le risque de brûler les lampes avant de fermer l'interrupteur principal.

Après la mise en circuit de chaque groupe de lampes, il faut examiner s'il ne se produit pas d'étincelles aux balais et décaler ceux-ci soit en avant, soit en arrière, jusqu'à disparition des étincelles.

Dans une machine en bon état la variation de position des balais doit être très faible.

Si l'on ne peut trouver une position des balais qui fasse disparaître les étincelles, il faut en rechercher la cause :

1. — Dans une insuffisance de pression des balais que l'on peut corriger en agissant sur les vis de réglage.

2. — Dans l'écartement des fils si les balais sont faits de fils. Cet écartement peut être dû à un excès de pression sur le collecteur ou à une déformation du balai.

3. — A un rebroussement des fils ; on redressera ces derniers en les étirant légèrement à l'aide d'une pince.

4. — A une position défectueuse des balais sur le collecteur.

Si les étincelles se produisent en avant des balais, on avancera ceux-ci dans le sens de la rotation de la machine ; si elles se produisent en arrière, on reculera les balais.

De même, il faudra avancer légèrement les balais si l'on allume de nouvelles lampes, et les reculer si l'on en éteint.

La machine ayant pris son débit de régime, on nettoiera le collecteur en appliquant légèrement à la main un morceau de *papier de verre*, et non de *toile d'émeri*, que l'on promènera sur toute la longueur du collecteur ; puis on opérera de même avec un chiffon de coton légèrement gras, pour éviter un grippement possible des balais sur le collecteur. Il ne faut jamais verser d'huile sur le collecteur.

Ce nettoyage doit être fait toutes les quatre ou cinq heures.

On s'assurera ensuite que les paliers ne s'échauffent pas et que le graissage se fait régulièrement.

Après quelques heures de marche la température de la machine a pris sa valeur finale.

La main doit pouvoir rester appliquée sur les enroulements des inducteurs, s'ils sont fixes : si, au contraire, l'induit est fixe, la température de ce dernier ne doit pas excéder 55 à 60 degrés centigrades.

Si ces températures limites viennent à être dépassées, la cause en est à un débit trop intense, et qu'il est facile, du reste, de vérifier à l'aide de l'ampèremètre et du voltmètre du tableau de distribution.

Cet excès peut être dû aussi à une perte à la terre ou à l'allumage d'un trop grand nombre de lampes.

S'il s'agit d'une dynamo série on ralentira la vitesse de la rotation, ou l'on augmentera la résistance du rhéostat jusqu'à ce que l'ampèremètre indique un débit normal.

Si la dynamo est excitée en dérivation, on ramènera le voltage à sa valeur normale en diminuant la vitesse de rotation ou en introduisant des résistances du rhéostat d'excitation.

L'intensité sera réduite, s'il y a lieu, en retirant des lampes en circuit.

Dans le cas d'une dynamo à excitation compound, on ramènera la différence de potentiel aux bornes et l'intensité à leur valeur normale en agissant comme dans le cas précédent.

Quand la machine est placée dans un local dont l'atmosphère est chargée de poussières, on recouvre la machine d'une boîte en bois qui laisse dépasser le collecteur tout entier.

Arrêt de da dynamo. — On procède tout d'abord à l'arrêt du moteur, et pendant que ce dernier continue à tourner sous l'influence de la vitesse acquise, on introduit toutes les résistances du rhéostat d'excitation, puis on ouvre l'interrupteur principal, et quand la dynamo ne tourne plus que lentement, on soulève les balais que l'on maintient sur des cales de bois pour empêcher un rebroussement possible au moment de l'arrêt final du moteur.

Si l'arbre de la dynamo porte une poulie folle, on débrayera et l'on opérera ensuite comme ci-dessus.

Entretien journalier. — Pendant les périodes de repos, on doit nettoyer la dynamo comme s'il s'agissait d'une machine à vapeur ; c'est là un soin trop souvent négligé.

1. — Il faut examiner une à une les touches du collecteur, pour rechercher si il ne s'en trouve pas qui présentent l'aspect brûlé, indice de production d'étincelles nuisibles.

2. — Les balais, s'ils sont encrassés, seront brossés et au besoin nettoyés à l'alcool ou à l'essence de térébenthine ; si des soudures se sont formées on les coupera

avec soin, on retaillera le balai en lui donnant la forme voulue s'il est à application tangentielle.

3. — Les balais à application oblique s'usant inégalement on coupera les parties qui dépassent.

4. — Quand un balai à application tangentielle est usé d'un côté on le retourne, et quand les deux côtés le sont, on coupe la partie usée, et l'on ajuste l'extrémité à la lime.

Pour faire cette dernière opération, il est bon de maintenir le balai dans un cadre en bois, serré dans un étau. On risquerait autrement de déformer le balai.

5. — Quand on monte les balais à application tangentielle dans leur gaine, il faut les fixer de telle sorte qu'ils dépassent le collecteur de quelques millimètres.

6. — On brossera le collecteur, les connecteurs et l'induit, en faisant tourner la machine à la main.

7. — S'il y a lieu, on videra les godets graisseurs et les boîtes de graissage que l'on nettoiera au pétrole.

8. — De temps à autre on vérifiera si la tension de la courroie semble suffisante et s'il ne se produit pas de décollement des bandes ou de cassure des fils de suture de ses divers éléments.

Défaut d'isolement entre les différentes parties de la dynamo. — Pour vérifier l'absence de communication entre deux parties de la dynamo, il suffit de mettre celles-ci en circuit avec une pile et un galvanomètre.

L'absence de déviation indique un isolement sans faute ; une déviation indique au contraire qu'il y a une communication entre les deux parties considérées.

L'examen devra tout d'abord porter sur les balais que l'on mettra en circuit deux à deux avec la pile et le galvanomètre.

Puis on mettra successivement en circuit avec la pile et le galvanomètre :

1. — Les bobines de l'induit entre elles.

2. — Les bobines de l'induit avec le noyau magnétique.

3. — Les bobines de l'induit avec l'arbre de rotation ou tout autre point de la masse.

4. — Les bobines des inducteurs entre elles après avoir détaché leurs connexions.

5. — Les bobines des inducteurs avec la masse.

6. — Les balais avec la masse.

On peut s'assurer du bon état de l'isolement des inducteurs avec la masse en mettant tour à tour en communication chaque balai avec celle-ci, quand la machine tourne. Si l'isolement est convenable, il ne doit pas se produire d'étincelles aux balais.

Néanmoins, si le courant est produit sous une tension élevée, il peut y avoir une légère augmentation des étincelles. Il va de soi que cet essai n'est possible qu'autant que la masse de la dynamo est complètement isolée du sol.

Résistance d'isolement des dynamos et transformateurs. — D'après M. Picou.

Dynamo Edison, 125 volts, 800 ampères. 0,1 mégohm
Alternateur W_3 Zipernowsky (Edison) . . 3,14 —

D'après M. Laffargue.

Dynamo Edison 110 volts, 363 ampères, essayée à 240 volts :

Isolement entre l'induit et la terre. .	10 à 50	mégohms
— — l'inducteur — . .	50 à 270	—

Mise hors circuit d'une résistance a grande self-induction. — La méthode suivante indiquée par

M. Hermann permet de retirer du circuit, sans inconvénient, une résistance à grande self-induction, comme c'est le cas pour les inducteurs d'une machine à excitation shunt.

M. Hermann monte en dérivation, sur les extrémités de la résistance à self-induction, une résistance convenable sans self-induction ; un interrupteur spécial permet de la mettre en circuit.

Si l'on appelle *u* la valeur de la différence de potentiel après la rupture, aux bornes de la résistance R à self-induction, à l'instant *t*, R_1, étant la résistance sans self-induction, on trouve que la valeur maximum de *u* est à l'instant *t* :

$$U = u \frac{R_1}{R}$$

En choisissant convenablement R_1 on peut donner à U telle valeur que l'on voudra. Si on prend $R_1 = 2\,R$, la force électromotrice d'induction ne pourra dépasser le double de la valeur de la force électromotrice du courant.

Dans la pratique, on fermera d'abord l'interrupteur de la résistance sans self-induction, et ensuite on ouvrira l'interrupteur principal. Pour la mise en marche, on laisse ouvert l'interrupteur auxiliaire afin de ne pas dépenser inutilement de l'énergie dans la résistance sans self-induction.

Recherches sur l'échauffement de l'induit dans les dynamos. — M. Rechniewski a présenté à la Société Internationale des Electriciens le résultat de ses recherches sur l'échauffement de l'induit des dynamos sans toutefois tenir compte de l'action des courants parasites.

Il a constaté sur une machine Siemens de 3 300 watts à induit enroulé en tambour, qu'après l'établissement d'un régime constant, ce qui demande environ deux heures, la température de l'induit était de 51 degrés au-dessus de celle de la température ambiante. Si l'on tient compte de la surface extérieure de l'enroulement, on trouve que 7,14 centimètres carrés de surface refroidissante correspondent à 1 watt d'énergie transformée en chaleur.

Une autre expérience sur une machine de 5 750 watts, type Siemens, fournit pour un échauffement de 50 degrés, 7 centimètres par watt d'énergie transformée en chaleur. Une autre expérience sur une machine de 2 600 watts accuse 7,5 centimètres carrés par watt.

M. Rechniewski a exécuté d'autres expériences sur une machine parfaitement ventilée, et il a trouvé, pour le même excès de température, 4,25 centimètres carrés par watt.

Dans une expérience sur une machine multipolaire de 36 000 watts dont la surface induite se décompose comme suit :

Surface extérieure	3.900	cent. carrés
— des deux calottes.	1.590	—
— intérieure	1.950	—
Soit une surface totale de	7.440	—

L'auteur a trouvé, lorsque, à la vitesse de 690 tours, la machine développait 120 volts et 330 ampères, qu'après trois heures de marche la température de l'induit était de 30 degrés supérieure à celle de l'atmosphère ambiante ; il en résultait que la surface refroidissante était de 3,3 centimètres carrés par watt. La même machine à

490 tours donnait un courant de 75 volts et de 400 ampères ; dans ces conditions, la surface refroidissante était de 3,56 centimètres carrés.

M. Rechniewsky mesurait la température à l'aide d'un thermomètre entouré de ouate et fixé à l'induit.

CHAPITRE VI

DESCRIPTION DE QUELQUES DYNAMOS PARTICULIÈRES

DYNAMOS A COURANT CONTINU

Dynamos type Manchester. — Créé par J. Hopkinson, ce type tend aujourd'hui à se répandre grâce aux qualités particulières qu'il présente, de solidité, stabilité, construction facile, auto-régulation approchée.

Le champ inducteur est formé par l'action de deux électro-aimants cylindriques, formant deux circuits magnétiques distincts et n'ayant de commun que l'armature. Cette disposition assure une distribution symétrique des lignes de force :

Parmi les machines construites sur ce principe, nous citerons celles de Brown et de Sautter-Harlé.

Pour cette dernière fig. 69 et 70 l'induit est enroulé en tambour sur un noyau formé de disques de tôle isolés au papier et clavetés sur un manchon.

Les perforations destinées à recevoir le fil induit ont 12 millimètres de diamètre et arrivent à 1 millimètre de la périphérie.

Les disques de tôle, au nombre de 570 (pour une machine de 400 ampères, 70 volts à 400 tours), mesurent 514 millimètres de diamètre extérieur, 220 millimètres de diamètre intérieur et 0,6 millimètres d'épaisseur. Le fer de l'induit présente une section droite totale de 480 cent. carrés.

Le circuit induit logé dans le noyau est fait de fil de

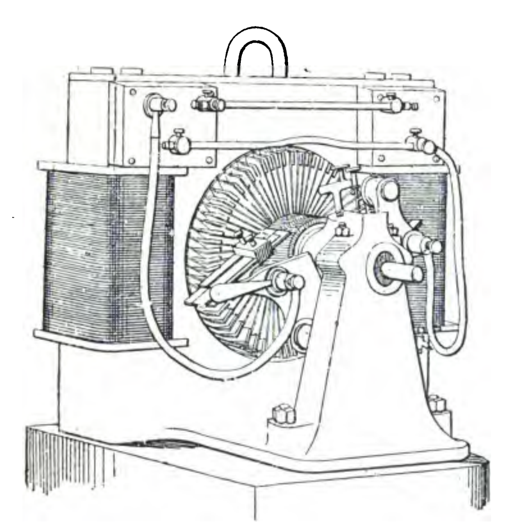


Fig. 69. — Machine Sautter et Harlé.

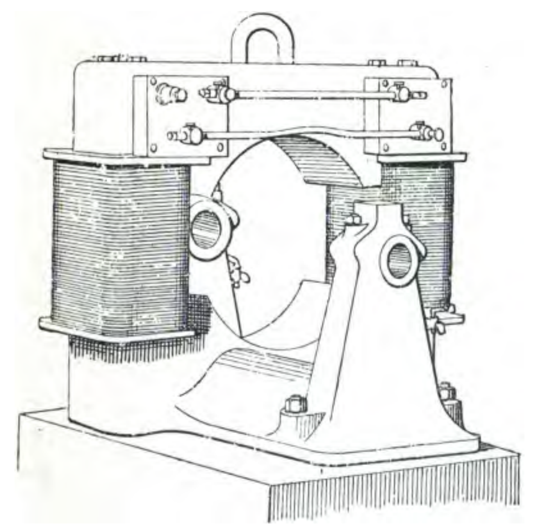


Fig. 70. — Inducteurs de la machine Sautter et Harlé.

9, 2 millimètres de diamètre ; les connexions terminales sont faites de boucles de cuivre refendues en deux et recourbées.

Le nombre des conducteurs à la périphérie est de 80, double de celui des touches du collecteur.

La résistance de l'induit est de 0,00323 ohm.

Le circuit inducteur, monté en shunt, est formé de 2800 spires de fil de 3,2 millimètres de diamètre et mesure 6 ohms de résistance. Une résistance additionnelle de 1 ohm est montée en série pour régler le débit.

Dynamo Pieper. — Les pièces polaires, le socle et les supports des paliers sont coulés d'une seule pièce.

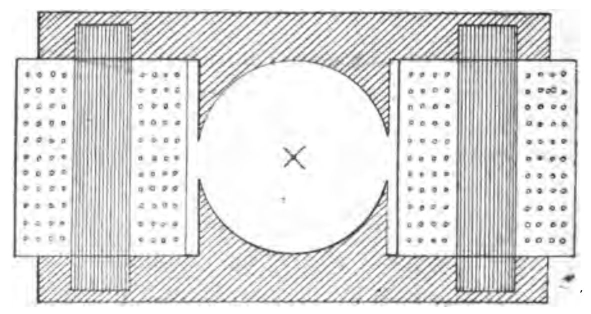


Fig. 71. — Dynamo Pieper.

Les pièces polaires qui présentent des étranglements destinés à réduire les flux transversaux fig. 71 tiennent ensemble par des prolongements qui se rejoignent, mais ces prolongements sont amincis et percés d'orifices pour diminuer les pertes de flux qu'ils engendrent.

Les enroulements inducteur, et induit, ne présentent aucune particularité.

Dynamo de la Société Alsacienne. — Le nouveau

type réalise des perfectionnements sur l'ancien en ce sens qu'il produit un champ magnétique symétrique par rapport à un plan horizontal passant par l'axe de rotation.

Pour éviter que le champ ne soit plus intense entre les parties inférieures qu'entre les pièces polaires elles-mêmes, on a donné un développement plus grand à ces dernières.

La figure 72 montre la disposition générale de la machine.

L'induit I est compris entre les pôles PP' d'un électro-aimant en fer forgé.

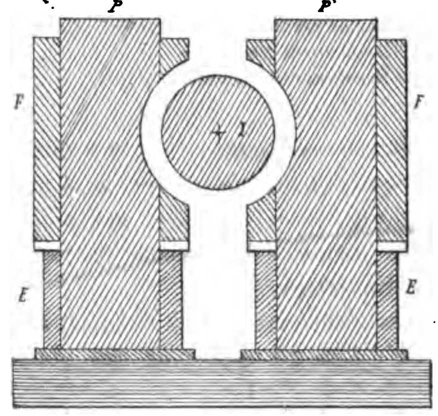


Fig. 72. — Dynamo de la Société Alsacienne.

L'enroulement est placé en E, et les pôles PP' sont renforcés à leur extrémité supérieure, pour la raison donnée ci-dessus par un revêtement F en fonte.

Le collecteur est isolé à l'air, ce qui permet son graissage à l'huile et l'emploi d'un métal quelconque pour la confection des touches.

Il est fait de deux parties ; la première, sous-jacente, est en cuivre ou bronze et montée à demeure sur la machine. La seconde, mobile, est faite de barres d'acier vissées sur celles de cuivre.

Les balais frottent sur les barres d'acier, dont l'usure est très lente et le remplacement facile.

Les paliers sont fixés à leur support par un joint cylindrique et ils se centrent toujours d'eux-mêmes.

Voici quelques chiffres relatifs à l'essai d'une machine de 25 kilowatts :

Vitesse angulaire	450 tours par minute
Perte pour excitation des inducteurs.	550 watts
Perte dans l'induit.	915 —
Pertes par frottements, hystérésis, etc	780 —
Rendement électrique	94,5 pour cent
Rendement commercial	91,7 —

Induit en disque. — Cette disposition ne peut convenir que dans le cas où le champ magnétique est constitué par une série de pôles magnétiques, c'est-à-dire que cette forme d'armatures ne convient qu'aux machines multipolaires.

Dans une machine à disques, les spires de l'induit, au lieu d'être groupées sur des plans passant par l'axe de rotation de l'induit, sont rabattues sur un plan perpendiculaire à cet axe.

Le plan des spires induites tourne entre deux séries d'électro-aimants formant un certain nombre de champs de signe alternativement contraire.

Dans les machines de cette catégorie l'épaisseur du disque est très faible, et les pôles peuvent être assez rapprochés pour permettre d'éviter l'emploi d'un noyau de fer dans l'induit. On évite, ainsi, la perte d'énergie par suite de la production des courants de Foucault et des phénomènes d'hystérésis.

La ventilation de l'induit se fait très facilement et d'elle-même, et comme on peut augmenter sans inconvénient le diamètre du disque, le rendement utile d'une *section* de l'induit est plus grand ; d'autre part, en raison

de la grandeur absolue du diamètre du disque, la vitesse de rotation est sensiblement réduite en comparaison avec une dynamo à induit en anneau ou en tambour ; par suite l'accouplement direct avec l'arbre moteur peut être obtenu sans transmission intermédiaire.

Les spires de l'induit sont connectées comme dans le

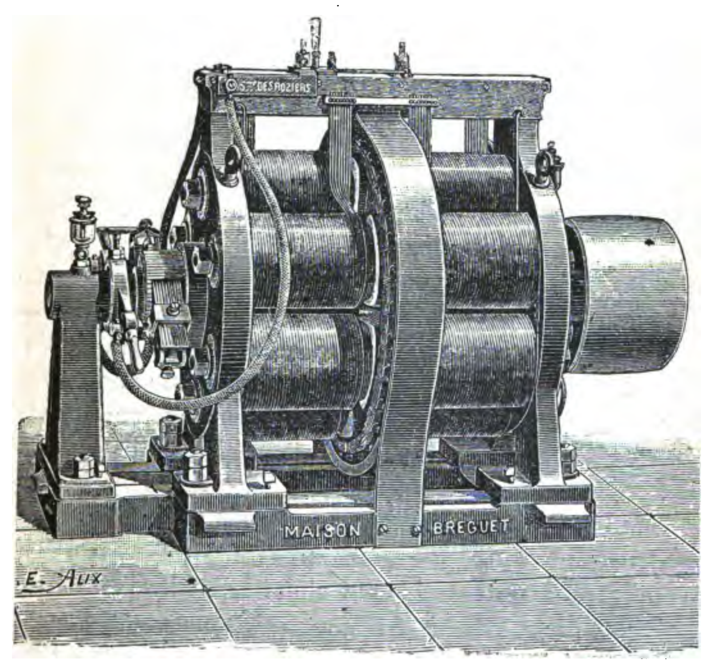


Fig. 73. — Machine Desroziers.

cas des dynamos à courant continu et le courant est recueilli par une paire de balais.

Comme exemple nous donnons ci-dessus la description de la dynamo Desroziers dont la figure 73 montre la vue d'ensemble.

Les fils de l'induit sont disposés en partie, suivant des rayons, ou plutôt des factions de rayons comprises entre deux circonférences concentriques, et en partie, suivant deux couronnes de développantes. L'une de ces deux séries de développantes est composée des fils qui réunissent entre elles les extrémités des parties radiales sur la circonférence extérieure, l'autre est composée des fils qui réunissent les extrémités des parties radiales sur la circonférence intérieure.

Pour fixer les idées, nous supposons une machine à 6 pôles, naturellement alternés comme dans toutes les machines du même genre.

Ne considérons d'abord que les parties radiales des fils, et divisons la surface de l'induit (Fig. 74) en 6 segments égaux par 5 rayons O,A,B,C,D,E, que nous supposons correspondre aux 6 positions des fils pour lesquels la force électro-motrice développée est nulle. Tous les fils étant animés de la même vitesse angulaire, la force électro-motrice développée, dans chaque fil, est d'autant plus grande que le fil considéré est plus rapproché de l'axe d'un des segments.

L'induit doit fonctionner avec une paire de balais seulement, et tous les fils doivent être associés en série, comme dans un induit de machine bipolaire ordinaire. Les conditions électriques à remplir consistent donc à former deux séries de fils, partant l'une et l'autre d'un fil commun pour lequel la force électro-motrice développée est nulle ; composées chacune, à partir de ce point, de fils pour lesquels la force électro-motrice développée va constamment en augmentant d'un fil à l'autre jusqu'à un certain maximum ; puis constamment en diminuant, à partir de ce maximum, pour aboutir tou-

tes les deux à un même fil pour lequel la force électromotrice développée est encore nulle. Autrement dit, le fil

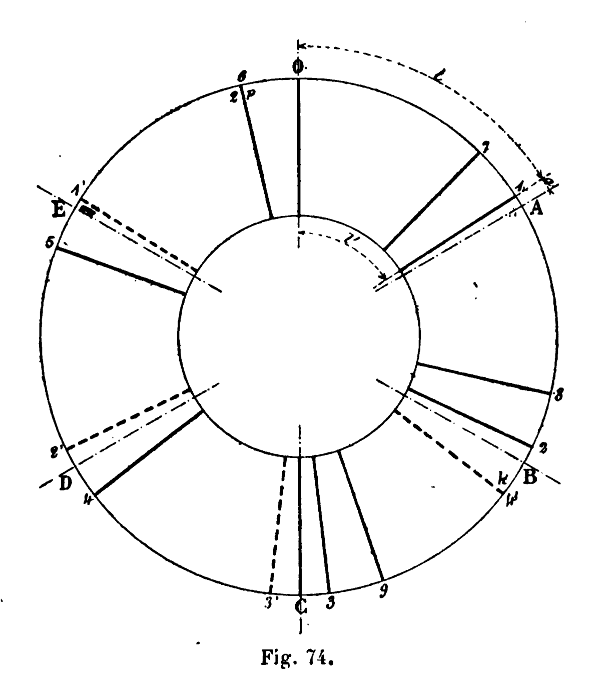


Fig. 74.

de départ et le fil d'arrivée des deux séries doivent être sur deux des rayons d'induction nulle qui sont tracés sur la figure 74, et les fils qui doivent former les 2 séries, doivent être connectés dans un ordre tel qu'ils s'écartent successivement de plus en plus de ces rayons, jusqu'à ce qu'on arrive, pour chaque série, à un fil qui passe par le milieu, ou plus près que tous les autres du milieu d'un segment. A partir de ce point, les fils doivent se rapprocher successivement de plus en plus des

rayons d'induction nulle, pour arriver au fil que nous avons choisi pour être le dernier commun aux deux séries.

Pour pouvoir placer les balais aux extrémités d'un même diamètre, choisissons comme fil de départ des deux séries celui qui est sur le rayon O, et comme fil d'arrivée celui qui est sur le rayon C, diamétralement opposé et numérotons les fils, dans la formation de chacune des séries, en suivant l'ordre dans lequel ils doivent être connectés.

Si on place un fil sur chacun des rayons d'induction nulle, tous ces fils doivent tout d'abord être connectés les uns à la suite des autres, puisque la force électromotrice développée dans chacun d'eux étant nulle, ils doivent tous être au commencement ou à la fin de l'une ou de l'autre des séries. On aurait alors à placer à la suite de ceux-là les fils qui en sont le plus rapprochés, et ainsi de suite. Mais si on veut que toutes les développantes qui servent à connecter les parties radiales soient égales, dans chacune des deux couronnes, on forme l'enroulement avec ces 6 fils seulement. Pour éviter cela, au lieu de mettre le fil 1, sur le rayon A, on le met en avant ou en arrière de ce rayon d'une certaine quantité a, mesurée par exemple sur la circonférence, extérieure, et appelons l la distance 01 mesurée sur cette même circonférence. Pour déterminer la position du fil 2, portons la même longueur l à partir du point 1, et ainsi de suite pour tous les autres fils en allant toujours dans le même sens.

Toutes les fois que l'on porte la longueur l sur la circonférence, pour déterminer la position d'un nouveau fil, ce fil a donc un retard sur le rayon d'induction nulle

correspondant, plus grand que le retard du fil précédent sur le rayon d'induction nulle précédent, de a. Il est évident qu'en procédant ainsi, les fils vont en s'éloignant successivement de plus en plus des rayons d'induction nulle, jusqu'à ce qu'on arrive à un fil qui corresponde avec le milieu d'un segment; et qu'à partir de ce fil ils vont en se rapprochant de ces rayons, jusqu'à ce que l'on retombe sur l'un deux.

Comme les deux séries de fils doivent aboutir au rayon commun C, on a dû prendre la longueur a telle que l'on arrive à la fin de l'enroulement à un certain point k qui soit distant du point C de la longueur l. C'est-à-dire que si l'on perd, sur $1/6^e$ de circonférence toutes les fois que nous portons la longueur l sur la circonférence, une longueur a; arrivé au point k, on doit avoir perdu un nombre q de fois a tel, que $qa = l$. Le nombre q exprime évidemment le nombre de fils placés, ou le nombre de points ou sommets, qui déterminent sur la circonférence extérieure les positions de ces fils. En portant l à partir de k on arrive donc au point C, et l'on a ainsi constitué une des deux séries.

En procédant comme nous venons de l'indiquer, on forme un polygone étoilé, qui doit être régulier pour que tous les fils radiaux soient également distants les uns des autres. On démontre aisément que ce polygone étoilé, pour répondre aux conditions de l'enroulement, doit être de la forme

$$N = 2\,(p.n \pm 1)$$

N étant le nombre de côtés ou de sommets du polygone, p le nombre de paires de pôles et n le nombre de côtés compris dans la longueur l.

$$2\,pn = N - 2.$$

Dans la pratique, l'enroulement se fait sur un plateau percé de trous aux extrémités des fils radiaux ; les extrémités de ceux-ci passent par les trous, et les connexions en développantes parallèles sont sur l'autre face du plateau. Il s'ensuit que d'un côté du plateau, tous les fils

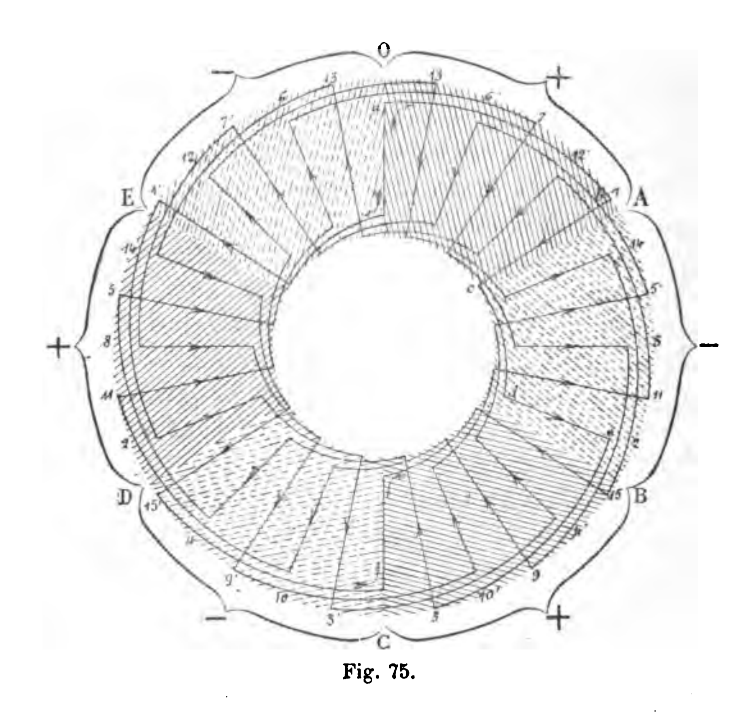


Fig. 75.

sont radiaux, et que de l'autre côté ils sont tous parallèles. Les croisements de fils sont de cette façon complètement évités.

De plus, pour des considérations mécaniques, l'enroulement se divise entre deux plateaux, que l'on fixe ensuite de chaque côté d'un disque métallique supporté

par un moyeu, et par l'arbre de la machine. Pour arriver à répartir l'enroulement sur les deux plateaux, remarquons que la partie *a,b,c,d,e* (Fig. 75) se répète constamment avec la même forme. Considérons cette partie comme une section, et plaçons-la sur le plateau avant. Puis plaçons la section suivante, celle qui commence au point *e* ou 2, et finit au point 4, sur le plateau arrière; puis celle qui suit celle-là sur le plateau avant, et ainsi de suite en alternant. On fait ainsi tout l'enroulement en plaçant la moitié des fils sur chaque plateau. La figure 76 montre la répartition des fils sur chacun des

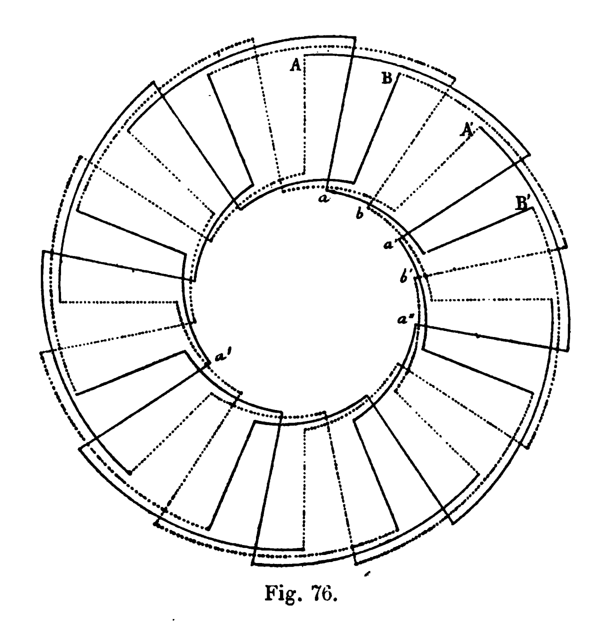


Fig. 76.

plateaux. Les traits pleins, par exemple, indiquent les fils du plateau avant, les traits pointillés, ceux du

plateau arrière. La figure 77 montre les fils du plateau avant séparés de l'autre moitié de l'enroulement.

Les deux moitiés de l'enroulement se font séparément sur chacun des deux plateaux ; on fait alors sortir les bouts de fil des extrémités de chaque section, puis on

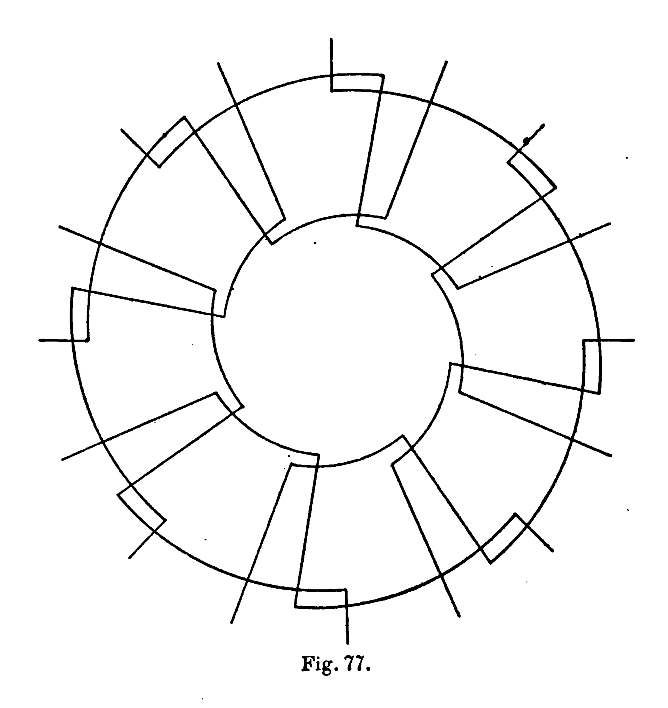


Fig. 77.

monte les plateaux de chaque côté du disque métallique dont nous avons déjà parlé, en mettant les fils radiaux du côté du disque. Il ne reste plus alors qu'à réunir par des soudures les bouts des fils d'un plateau à ceux de l'autre, pour reconstituer l'enroulement dans son ensemble. On a soin de faire sortir les bouts des sections

d'une façon telle que chacun d'eux tombe en face de celui de l'autre plateau avec lequel il doit être soudé.

Pour ne pas trop multiplier le nombre de côtés du polygone étoilé, qui détermine le nombre des sections, et pour augmenter la longueur de fil induit, au lieu de donner à chaque section la forme que nous avons indiquée, on fait revenir le fil plusieurs fois sur lui-même, comme l'indique la fig. 78. On place alors généralement

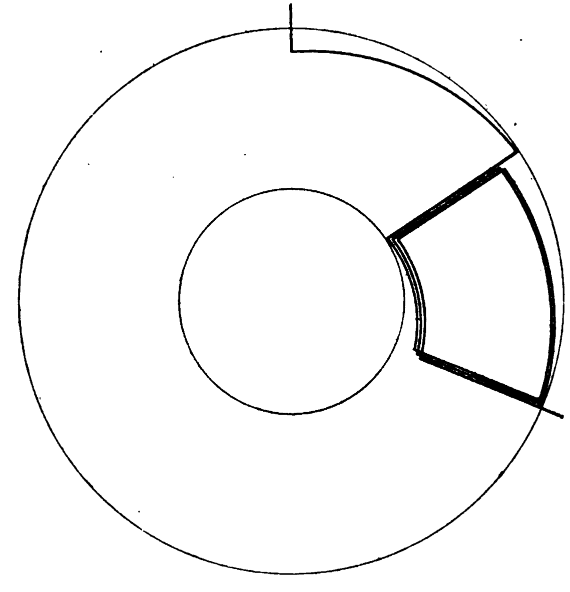


Fig. 78.

les développantes de la même section, les unes sur les autres.

Voici maintenant comment les différentes sections de l'induit sont reliées au collecteur. Revenons pour cela à

la figure 3. Jusqu'ici, nous avons considéré comme commencements des sections, les points ABA'B'... de jonction des fils du plateau avant avec ceux du plateau arrière. Comme on ne peut prendre ces points pour réunir les différentes parties de l'induit au collecteur, nous supposerons les commencements des sections aux points *a*,*b*,*a'*,*b'*...... Remarquons de plus que les points *b*,*b'*... sont sur le plateau arrière, c'est-à-dire du côté opposé au collecteur, et qu'on ne peut les réunir facilement à celui-ci. Supposons donc que l'on réunisse l'induit au collecteur toutes les deux sections, c'est-à-dire par les points *a*,*a'*,*a''*..... seulement.

Considérons le point *a* (fig. 79) ; supposons qu'il soit sur un des rayons d'induction nulle, et que les courants induits, qui tendent à se former, partent de ce point ; il doit être réuni à la lame 6 du collecteur qui est sous le balai par lequel entre le courant. Lorsque tout le système a fait 1/3 de tour, le point *a* et lui seul est encore sur un des rayons d'induction nulle, et doit encore être le point d'origine des courants qui traversent l'induit, il doit donc encore être réuni à la lame qui est sous le même balai. Or, à ce moment, c'est la lame *c'*, qui est de 120° en retard sur *c*, qui est sous le balai ; le point *a* doit donc aussi être réuni à la lame *c'*. De même quand le système a fait 2/3 de tour, c'est-à-dire 240° à partir

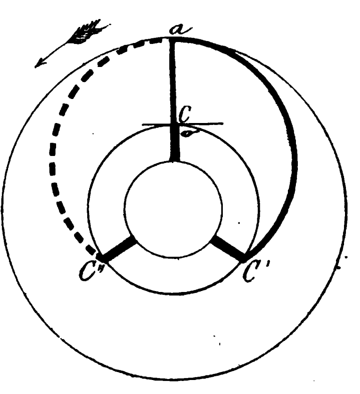


Fig. 79.

du point de départ, le point a se retrouve encore une fois dans les mêmes conditions, il doit donc encore être réuni à la lame qui est en ce moment sous le balai ; cette lame est la lame C″ qui est de 240° en arrière sur C ou de 120° en avance. Il en est évidemment de même pour l'autre balai et pour tous les points $aa'a''$..... Chacun de ces points doit donc être réuni à trois lames du collecteur, placées à 120° les unes des autres. Il s'ensuit que le nombre des lames du collecteur doit être trois fois plus grand que celui des points à réunir au collecteur.

Les connexions qui réunissent les points $a,a'a'$ au collecteur sont facilitées et régularisées par un appareil appelé connecteur (fig. 80).

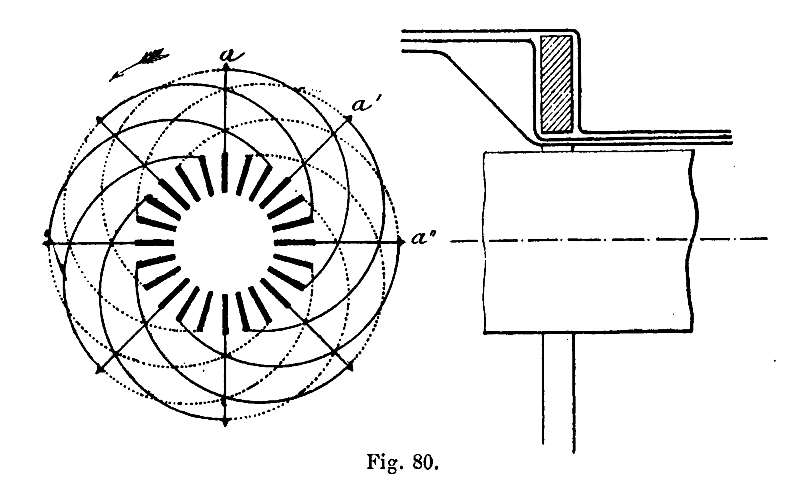


Fig. 80.

Cet appareil se compose d'un cylindre en bois, sur lequel est monté un plateau circulaire également en bois. Les fils qui vont directement de l'induit au collecteur, traversent simplement le plateau. Ceux qui doivent aller

à la lame qui est à 120° à droite, s'arrètent sur la face avant du plateau, parcourent une dévéloppante qui les amène en face de cette lame, et se redressent suivant une génératrice du cylindre pour aller s'y souder. Enfin ceux des fils de connexion au collecteur, qui doivent aller à la lame qui est à 120° à gauche, traversent le plateau, parcourent sur la face arrière une développante égale et de sens contraire à celle de la face avant, et se redressent comme eux pour aller au collecteur.

En opérant ainsi, on évite, comme pour l'induit lui-même, toute cause de croisements des fils.

Toutes ces différentes parties : induit, connecteur et collecteur sont exécutées séparément, sont ensuite montées sur l'arbre et assemblées entre elles.

Ampères	Volts	Nombre de tours par minute	Diamètre de la poulie
125	110	800	340
220	110	800	400
300	110	650	500
400	110	650	500
500	110	500	700
800	120	350	900
1200	120	300	spécial
1600	120	300	»
200	70	800	340
320	70	800	400
450	70	650	500
600	70	650	500
780	70	500	700
1200	70	350	900
2000	70	300	spécial
2500	70	300	»

125 200 300 150 300	70 70 70 100 100	350 350 350 350 350	Commande par accouplement élastique

MACHINES A COURANTS REDRESSÉS. — L'induit des machines de cette catégorie est divisé en un nombre pair de groupes, supposons-en deux, qui sont reliés à un dispositif spécial dit *commutateur.*

Ce dernier est formé de deux bagues de cuivre de forme particulière, isolées et montées sur l'axe de l'induit, et reliées chacune à l'une des extrémités du fil qui compose l'enroulement du groupe. Ce dernier est formé

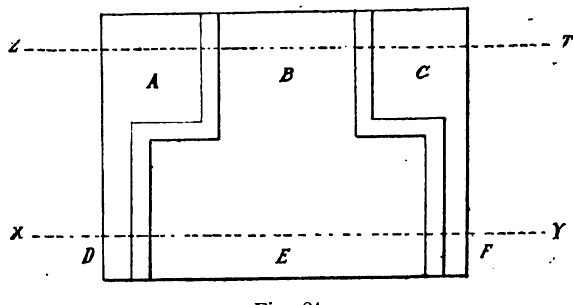


Fig. 81.

de deux enroulements placés chacun à une extrémité d'un des diamètres de l'induit. Deux balais fixes frottent sur les lames du commutateur.

Les choses sont disposées de telle sorte que, au moment où les enroulements d'un groupe vont permuter, c'est à dire au moment où la force électromotrice va changer de signe, l'une des bagues passe d'un balai sous l'autre.

Les balais recueillent donc un courant dont la force électromotrice est toujours de même signe, et la direction du courant dans les conducteurs reste constante.

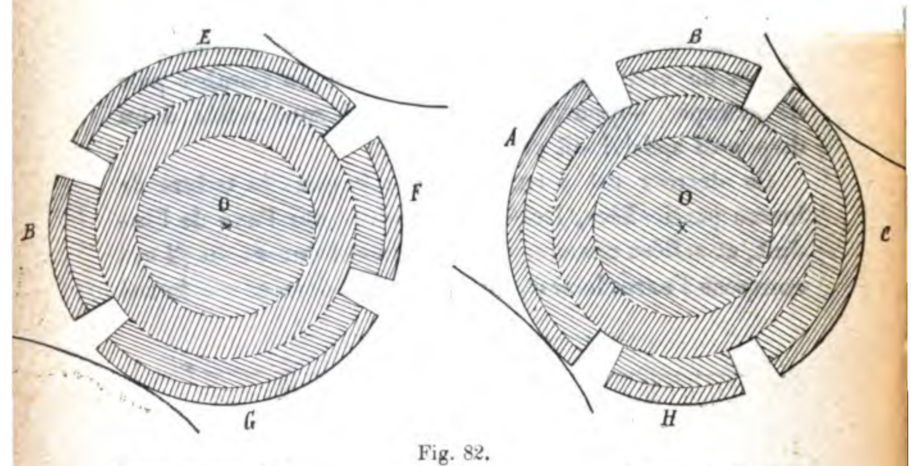


Fig. 82.

Coupe suivant XY. Coupe suivant ZT.

La différence de potentiel aux bornes de la dynamo varie périodiquement ; elle subit des soubresauts que l'on atténue en multipliant le nombre des groupes et celui des commutateurs dans la même proportion.

Les figures 81 et 82 représentent en plan et en coupe suivant deux axes XY et ZT le commutateur de la machine Brush.

Leur examen montre bien comment s'effectue le passage des balais d'une bague sur l'autre et le *redressement* du courant engendré dans les spires de l'induit.

Dynamo Thomson-Houston. — L'induit, de forme

sphérique, est construit de la manière suivante : Sur

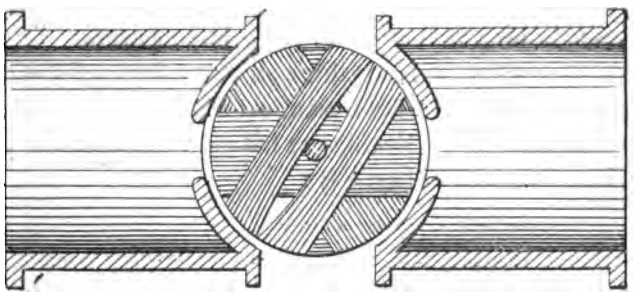


Fig. 83. — Induit de la machine Thomson-Houston.

l'arbre, sont clavetées deux coquilles creuses, recouvertes de papier verni, et portant extérieurement des chevilles de bois destinées à maintenir les fils de l'induit. Ce dernier est formé par trois bobines élémentaires dont les bouts internes sont réunis entre eux, et les bouts externes chacun à une touche du commutateur. Ces trois bobines forment entre elles un angle de 120°.

Le système inducteur est formé de deux tubes de fonte à joues aux extrémités intérieures desquels sont fixées deux coupes creuses qui se regardent et enveloppent l'induit (fig. 83).

L'enroulement inducteur est monté sur les tubes de fonte, et ceux-ci sont réunis par des barres de fer disposées régulièrement tout autour de la masse cylindrique pour former la culasse de l'électro-aimant.

Le commutateur est formé de trois touches et il supporte 4 balais réunis deux à deux : il y a 2 balais positifs AB et deux balais négatifs A' B'. Chaque groupe de balais est relié à une extrémité d'une bobine de l'inducteur dont l'autre extrémité aboutit à l'une des bornes du circuit extérieur.

Le chemin suivi par le courant est donc : les balais positifs, une bobine inductrice, le circuit extérieur, la seconde bobine inductrice et les balais négatifs.

La régulation de la machine au point de vue du maintien de la constance du courant est obtenue par le décalage des balais. Ce décalage se fait automatiquement par le dispositif suivant (fig. 84) :

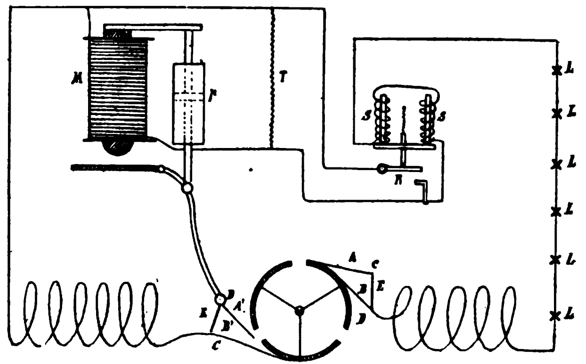


Fig. 84. — Mécanisme d'auto-régulation de la machine Thomson-Houston.

Les balais sont fixés à des leviers C. C D. D réunis par un bras E terminé par une armature de fer doux soumise à l'action d'un électro-aimant M.

Un amortisseur P formé d'une pompe à glycérine s'oppose à la production de mouvements trop brusques de l'armature.

Normalement, l'électro-aimant M est mis en court circuit par un circuit secondaire et n'agit que quand ce dernier est ouvert. En un point convenable du circuit principal sont intercalés deux solénoïdes S. S dont les noyaux sont supportés par un ressort et dont l'armature actionne le levier de contact R. Quand le courant devient

trop intense, ce contact est rompu et l'électro-aimant M fait lever son armature. Pendant ce temps, le levier R vibre entre ses positions extrêmes et la position des balais est modifiée dans le sens voulu ; une dérivation en charbon T de très grande résistance vient en outre réduire au minimum l'action destructrice de l'étincelle en R.

Il se produit de fortes étincelles entre les balais et les touches du commutateur, et les constructeurs ont

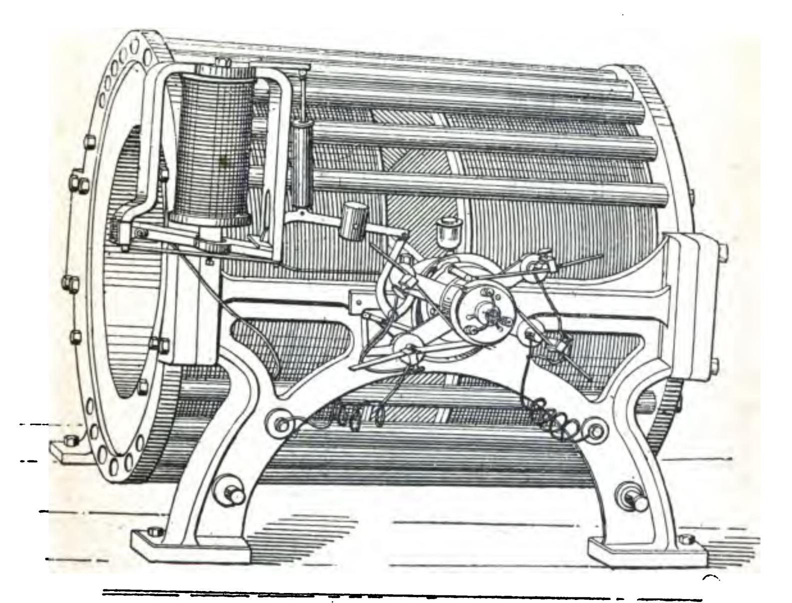


Fig. 85. — Machine Thomson-Houston.

tourné cette difficulté par l'adjonction d'un soufflet puissant qui, trois fois par tour, *souffle* un jet d'air énergique sur chaque touche. Cette solution, bien que très simple, n'en remplit pas moins les conditions

voulues pour la protection des balais et du collecteur, et, à ce point de vue, le fonctionnement de la dynamo Thomson Houston ne laisse rien à désirer.

Le commutateur est formé par trois touches de cuivre isolées à l'air, et son usure du fait des étincelles est insignifiante.

Ces machines renferment en moyenne 1 kg de cuivre pour 2,25 kg de fer, et leur induit supporte 2 mètres de fil par volt. Elles se construisent suivant deux modèles principaux débitant respectivement 9,6 et 6,8 ampères sous une différence de potentiel aux bornes qui peut atteindre 3000 volts.

CHAPITRE VII

MACHINES A COURANTS ALTERNATIFS

La force électromotrice produite par les machines de cette catégorie dites *alternateurs* varie périodiquement de signe ; elle est tantôt positive et tantôt négative.

Le temps que met le courant à effectuer un cycle alternatif complet s'appelle *temps périodique*, et on le désigne par T.

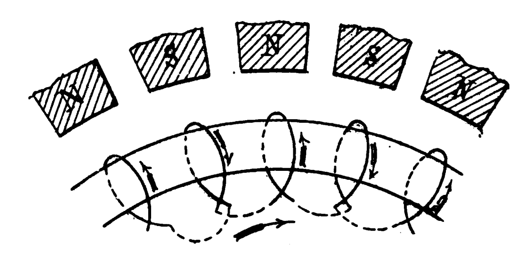


Fig. 86. — Principe de la machine à courants alternatifs à induit en tambour.

Le nombre de périodes divisé par le temps mis à les effectuer s'appelle *fréquence* ou *périodicité*.

Dans les machines courantes, la fréquence varie entre 40 et 100, quelquefois elle atteint 150 périodes par seconde.

De même que dans les machines à courant continu, on peut employer des induits enroulés en *anneau* en *tambour* ou en *disque*.

On remarquera (fig. 86 et 87) que les bobines élémentaires sont enroulées alternativement dextrorsum et sinistrorsum, et qu'elles sont chacune placées en regard de pôles magnétiques alternativement de nom contraire. Il en résulte que la force électromotrice est simultanément de même signe dans toutes les sections qui se trouvent montées en série.

Si les bobines étaient toutes sinistrorsum ou dextrorsum, il faudrait relier le bout finissant de l'une au bout finissant de l'autre, pour obtenir le même résultat que dans la disposition précédente.

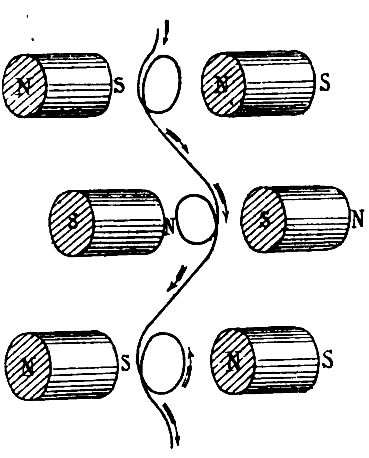


Fig. 87. — Disposition des circuits d'une machine à courants alternatifs à disque.

Induits en tambour. — L'enroulement en tambour tel que nous l'avons décrit à propos des dynamos à courants continus est peu employé. On lui a substitué des variantes.

Par exemple, fig. 85, on dispose les bobines induites enroulées sur elles-mêmes, sous forme de cylindre aplati à base elliptique, à plat toute autour de la surface du *noyau magnétique cylindrique.*

Induits en disque. — Les bobines élémentaires sont appliquées à plat sur la périphérie d'un disque, et prises chacune entre un pôle nord et un pôle sud perpendiculaires à leur plan (fig. 87).

Le champ magnétique est produit par deux couronnes d'électro-aimants parallèles au plan du disque induit.

Un pôle inducteur est de nom contraire à ceux des deux pôles voisins de sa couronne et du pôle de l'autre couronne qui lui fait vis-à-vis.

Les bobines induites sont reliées entre elles comme nous l'avons expliqué à propos des induits en anneau.

La figure 87 ci-dessus montre cette disposition.

Induits à fer tournant. — Nous rappellerons pour mémoire qu'il existe quelques alternateurs dans lesquels circuit induit et inducteurs sont fixes. La partie mobile est le noyau magnétique.

Collecteur et balais. — Le collecteur d'un alternateur est formé de deux bagues métalliques montées sur l'arbre de l'induit ; ces bagues sont isolées entre elles et de l'arbre.

Le circuit induit part de l'une des bagues *b*, fig. 89, forme l'induit I et se termine à l'autre bague *b* comme l'indique la figure.

Les balais peuvent être deux frotteurs C. C_1 ordinaires, mais généralement on emploie de préférence deux demi-bagues constituées par des lames de ressort en cuivre écroui qui sont appliquées sur le collecteur.

Si la machine fournit un courant de très haute tension, on doit placer les bagues assez loin l'une de l'autre et les séparer par un anneau surélevé en matière isolante.

Pour éviter les accidents au personnel, il est d'usage d'envelopper collecteur et balais dans une boîte à parois de verre (fig. 88) et d'entourer de caoutchouc les barres de prise de courants.

Excitation des Inducteurs. — On emploie très sou-

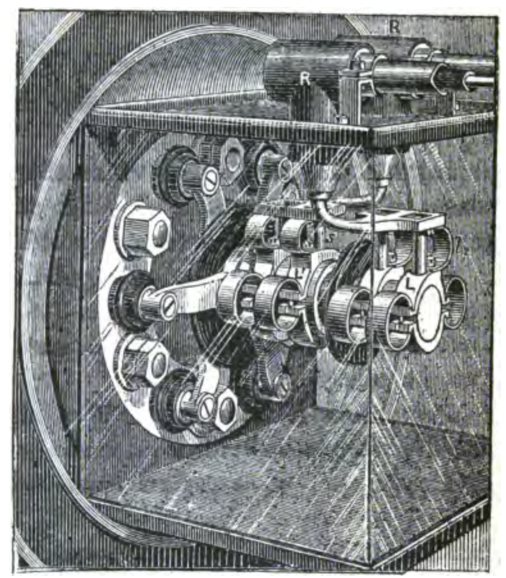


Fig. 88. — Prises de courants de l'alternateur Ferranti.

vent une dynamo spéciale pour produire le courant né-

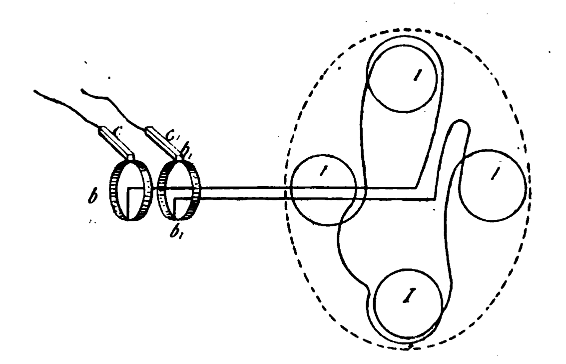


Fig. 89.

cessaire à la formation du champ magnétique inducteur.

Généralement cette dynamo est montée sur l'arbre même de l'alternateur et est établie pour avoir la même vitesse normale que ce dernier. Elle est excitée en dérivation.

L'alternateur est dit alors à *excitation séparée*. C'est le cas le plus fréquent.

Quelquefois on utilise une partie du courant de l'alternateur qui est dit alors à *auto-excitation :* nous citerons, par exemple, l'application qui en a été faite aux alternateurs Zipernowski.

L'induit de la machine est fixe et entoure l'inducteur mobile : ils comprennent l'un et l'autre même nombre de bobines ; supposons-en huit.

Sept des bobines induites sont reliées entre elles en série et les extrémités libres de leur circuit aboutissent aux bornes du circuit extérieur. C. C. C.

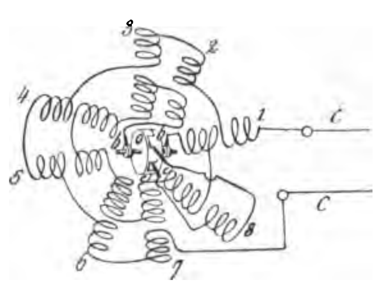


Fig. 90.

La huitième bobine est isolée des sept autres ; elle est reliée par une paire de balais C. C. à un commutateur *O* monté sur l'arbre de rotation, et dont les deux segments communiquent chacun avec une bague à frotteur : les deux balais *b. b.* forment les extrémités du circuit inducteur.

Le commutateur redresse le courant induit dans la bobine huit et l'envoie dans le circuit inducteur.

La figure 90 montre la disposition des enroulements de la machine auto-excitatrice Zipernowski.

Dans certaines machines on alimente les inducteurs avec le courant dérivé du circuit principal de la façon suivante.

On monte le circuit primaire d'un transformateur en dérivation sur les bornes de la machine, et l'on conduit les extrémités du secondaire à une paire de balais frottant sur un commutateur monté sur l'arbre de la partie mobile de la machine, et dont les lames communiquent chacune avec bague collectrice à balais. De là, le courant redressé est envoyé dans les inducteurs.

Alternateurs Compound. — Parmi les machines de cette catégorie, l'une des plus connues est celle du professeur Elihu Thomson; l'induit de cette machine est fixe et l'inducteur mobile.

Les bobines induites réunies en série aboutissent aux deux bagues collectrices ordinaires.

Les inducteurs *moins deux* sont excités par le courant d'une dynamo shunt munie de deux rhéostats de réglage, l'un sur son enroulement inducteur, l'autre sur son circuit principal.

L'arbre de l'alternateur porte un commutateur dont les deux lames sont réunies à l'enroulement des deux bobines inductrices *isolées*, d'une part, et au circuit principal d'autre part. Cette dernière connexion est faite de la manière suivante.

L'une des extrémités du circuit induit aboutit à l'une des touches du commutateur, tandis que l'autre touche est reliée à la bague collectrice; et, entre l'induit et la première touche d'une part, et la seconde touche et la bague d'autre part, aboutissent les deux extrémités d'un shunt fait de fil fin en maillechort.

Il en résulte que le courant principal doit traverser ou le commutateur ou le shunt.

L'excitation totale de la machine comprend donc deux courants, l'un constant produit par l'excitatrice et l'autre passant par le commutateur, variable et proportionnel au débit demandé à la machine.

Le rhéostat est ajusté pour compenser à 4 % près les variations de potentiel de la ligne.

Il n'y a donc lieu d'utiliser les rhéostats de l'excitatrice que quand il se produit une variation considérable sur la ligne. Ces rhéostats permettent aussi de réduire à zéro le courant sur le circuit principal sans couper ce dernier.

— La régulation de la force électromotrice peut être obtenue par la manœuvre d'un rhéostat comme dans le cas d'un courant continu ; elle peut être aussi réalisée par l'emploi d'un transformateur auxiliaire dont le primaire est relié aux bornes de l'alternateur et le secondaire est monté sur la canalisation. Ce dernier est divisé en un certain nombre de sections qui peuvent être mises toutes ensemble ou en partie sur le circuit d'éclairage par la manœuvre d'un commutateur.

Le transformateur relève la tension sur le circuit, et il est calculé de façon à produire une force électromotrice supplémentaire justement égale à la perte de charge maximum qui peut se produire sur le fœder.

Au fur et à mesure que la consommation diminue, et en même temps qu'elle la perte de charge, on retire du circuit des sections du transformateur.

Alternateurs pour distribution en série ou en dérivation. — Les machines destinées à un éclairage en série, c'est-à-dire celles qui doivent produire aux bornes une différence de potentiel variable avec le nombre de récepteurs en circuit, et un courant d'in-

tensité constante, auront un induit à grande self-induction.

On obtient ce résultat en logeant les bobines induites dans un noyau ou en les enroulant sur de longues plaques de façon à leur donner une grande inertie magnétique.

Les alternateurs destinés, au contraire, à alimenter des lampes en dérivation, et par suite à donner un courant d'intensité variable et de force électromotrice constante, devront avoir une résistance d'induit et un coefficient de self-induction aussi faibles que possible.

Couplage des bobines induites. — On peut appliquer au couplage des bobines induites entre elles des principes analogues à ceux que nous avons vu utilisés dans les machines à courant continu.

Alternateur à haute tension. — Les bobines seront toutes montées en série entre elles, ou divisées en groupes montés en quantité et réunis entre eux en série.

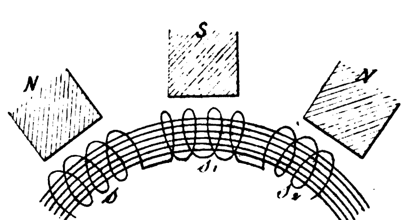


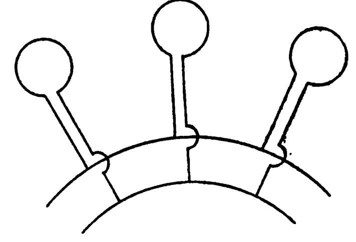
Fig. 91. — Groupement des bobines induites en tension.

Le montage en tension est celui que nous avons indiqué dans l'exposé des divers genres d'inducteurs.

Alternateur à basse tension. — Les extrémités de même nom des bobines sont réunies à un conducteur circulaire monté sur l'induit ; celui-ci portera donc deux conducteurs de cette nature l'un pour les bouts commençant et l'autre pour les bouts finissant, et chacun d'eux est relié à l'une des bagues collectrices.

La figure 92 montre le mode de couplage en quantité.

Puissance d'un alternateur. — La différence de phase entre la force électromotrice due au champ et le courant influe sur la valeur de la puissance de la machine.



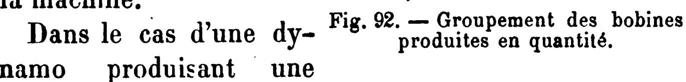


Fig. 92. — Groupement des bobines produites en quantité.

Dans le cas d'une dynamo produisant une force électromotrice sinusoïdale simple on aurait :

$$P_m = E_{ef} I_{ef} \cos \varphi$$
$$= \sqrt{e^2_m i^2_m} \cos \varphi$$
$$= \frac{1}{2} E_0 . I_0 \cos \varphi$$
$$= I^2_{ef} R$$
$$= \frac{E^2_{ef}}{R} .$$

La *puissance* diminue donc en même temps que l'angle de décalage augmente, c'est dire que la self-induction de l'induit est plus considérable. Les induits à noyau de fer sont donc, sous ce rapport, toutes autres conditions égales, inférieurs aux induits sans fer.

Mesure de la puissance d'un alternateur. — La méthode la plus simple consiste à monter l'alternateur sur un circuit sans self-induction et d'une section suffisante pour que l'échauffement occasionné par le passage du courant n'en accroisse par sa résistance *R* d'une manière sensible.

A l'aide d'un voltmètre et d'un électrodynamomètre on aura de suite les valeurs de I_{ef} et de E_{ef}.

La valeur de P_m se calculera aisément à l'aide d'une des formules ci-dessus, mais on remarquera que $\cos\varphi = 0$ puisque le circuit extérieur est dépourvu de self-induction.

On aura donc :

$$P_m = E_{ef}.I_{ef}$$
$$= I^2_{ef} R$$
$$= \frac{E^2_{ef}}{R}.$$

Dans le cas où le circuit extérieur possède un coefficient de self-induction L il faut calculer le *décalage*, c'est-à-dire $\cos\varphi$, et l'on peut appliquer l'une des deux méthodes suivantes.

Dans l'une on calcule :

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2 L^2}{T^2}}}$$

On connaît, bien entendu, la résistance du circuit extérieur, son coefficient de self-induction L et la période T du courant.

La seconde méthode consiste à calculer :

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{2\pi L}{T.R}$$

quotient de l'inductance par la résistance extérieure, à en déduire la valeur de φ et de là celle de $\cos\varphi$.

On peut quelquefois avoir besoin de connaître le coef-

ficient de self-induction d'un alternateur. On utilisera la formule :

$$L = \frac{T}{2\pi I_{ef}} \sqrt{E^2_{ef} - I^2_{ef}(r + R)^2}$$

dans laquelle r est la résistance de l'induit en ohms.

COUPLAGE DES ALTERNATEURS

Couplage en série. — Pratiquement, deux alternateurs ne peuvent être montés en série.

Quand bien même leur temps périodique serait le même, il arriverait toujours un moment où l'une des machines ralentirait, sous l'effet d'un glissement de la courroie par exemple, et il en résulterait un décalage.

Dans la suite, l'action réciproque des deux alternateurs aurait pour effet d'augmenter ce décalage pour en arriver à une extinction complète des lampes. L'une des machines marcherait comme génératrice et l'autre comme réceptrice.

Ce couplage n'est réalisable que si les deux machines sont montées sur le même arbre.

Différents dispositifs ont été proposés pour réaliser ce couplage, mais ils n'ont pas, à notre connaissance, reçu d'application pratique.

Couplage en quantité. — Par contre, deux alternateurs de même périodicité s'accouplent fort bien en quantité, et cette disposition est très employée dans les stations centrales.

Cette manœuvre est beaucoup plus compliquée que dans le cas des machines à courant continu, car il y a lieu de tenir compte des phases des courants.

Si l'on faisait le couplage à un moment quelconque, les deux alternateurs tendraient à se mettre en concordance de phase, brusquement, et il en résulterait une secousse susceptible de briser la courroie. Si la puissance motrice s'oppose au ralentissement de la machine *en avance*, cette dernière marchera comme génératrice sur l'autre qui fonctionnerait comme réceptrice : le débit du premier se trouve augmenté et compromet sa sécurité.

Le couplage peut, au contraire, être effectué au moment précis où les phases se superposent, c'est-à-dire quand la différence de potentiel est nulle entre deux bornes appartenant chacune à l'un des alternateurs.

Si, l'un de ceux-ci étant en circuit, on relie entre elles une borne de chaque machine et les deux autres par une résistance convenable contenant une lampe à incandescence, on remarque que l'éclat de celle-ci varie de 0 à un maximum. Le temps nécessaire à cette variation est d'autant plus long que les phases des deux machines sont plus près de la concordance.

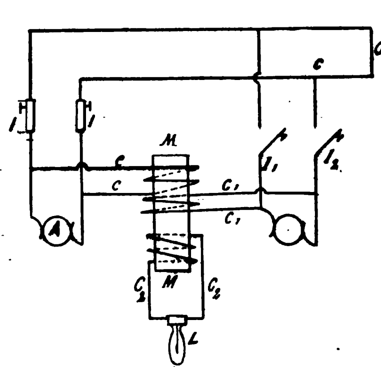


Fig. 93. — Indicateur de phases.

La lampe brille de son plus grand éclat quand, les deux phases étant en discordance, la différence de tension entre les deux bornes de la machine est maximum ; elle s'éteint, au contraire, quand cette différence

est nulle, les deux phases étant en concordance : c'est donc quand la lampe est éteinte que l'on doit mettre en circuit le second alternateur.

Un phénomène optique étant facilement décelable, on a utilisé la variation d'éclat d'une lampe pour déterminer l'instant propice au couplage.

L'appareil employé porte le nom d'*indicateur de phases ;* sa construction varie d'une fabrique à l'autre mais son principe reste le même, et nous nous bornerons ici à indiquer la marche à suivre pour faire ce couplage en quantité.

Soient A l'alternateur en circuit et B l'alternateur à coupler en quantité pour alimenter le circuit principal C. C. C : ils sont supposés à excitation indépendante et commandés chacun par un moteur.

L'indicateur de phases est représenté schématiquement fig. 93 par un noyau de fer portant trois enroulements dont deux sont respectivement en dérivation sur chaque alternateur et le troisième monté en série sur la lampe témoin L.

Le couplage s'effectuera comme suit : on couple les deux excitatrices *a. b* munies chacune d'un rhéostat dont la manœuvre permet à ce moment de conserver sa valeur au courant de *a*.

On imprime à B sa vitesse normale, on ferme I_1 et on lance le courant combiné des deux excitatrices dans les inducteurs de B. On intercale ensuite dans le circuit de B une résistance égale à celle du circuit de A.

On ferme ensuite les circuits C. C_1. C_2 de l'indicateur de phase et l'on suit les variations d'éclat de la lampe L. Quand celle-ci est à l'extinction on ferme I_2 et l'on supprime peu à peu la résistance intercalée sur B.

Le couplage se trouve effectué. Il n'y a plus lieu de s'en occuper, l'action réciproque des deux machines tendant à ramener la concordance des phases.

— Les dynamo auto-régulatrices ne peuvent être couplées par suite de la forme ondulatoire du courant d'excitation redressé.

On ne peut coupler que des alternateurs à excitation séparée.

ENTRETIEN, MISE EN ROUTE, REMÈDES, ACCIDENTS DES ALTERNATEURS

Accidents. — Les alternateurs sont sujets à des accidents qui procèdent soit de la formation d'un court circuit entre deux bobines ou d'un défaut d'isolement de la machine, sans parler des causes d'ordre purement mécanique.

Court circuit. — Nous laisserons de côté la formation d'un court circuit due au frottement ou au glissement d'une bobine sur une autre pièce de la machine, et signalerons seulement que la haute tension du courant peut, si le fil des bobines est mal isolé, donner lieu au début à une *fuite* et dans la suite à un véritable court circuit : les étincelles qui peuvent, pour cette même cause, éclater périodiquement entre deux fils à des potentiels différents détruira, à la longue, l'isolement des fils.

On n'aura plus pour indice d'un court circuit la production d'étincelles aux balais, comme dans le cas d'une dynamo à courant continu ; on ne s'apercevra généralement de l'accident que lorsque le mal est fait, par la variation d'éclat des lampes, ou les indications des appareils de mesure.

Il va de soi qu'un débit excessif de la machine peut brûler l'isolant des fils et donner un court circuit.

Défaut d'isolement. — Les courants alternatifs sont généralement produits à très haute tension, aussi y a-t-il lieu d'isoler parfaitement la dynamo du sol aussi bien pour éviter des accidents au personnel que pour empêcher des dérivations au sol qui, dans le cas d'un minime défaut dans la couverture d'un fil, peuvent à la longue mettre la machine hors d'usage.

Arrachement des bobines. — Cette cause d'accident dérive directement du principe même des alternateurs.

La force électromotrice produite dans une bobine change de signe au moment où les spires passent d'un champ magnétique dans un autre, et s'il n'y a pas concordance de phase entre les ampères et les volts, c'est-à-dire s'il y a décalage entre l'intensité et la force électromotrice, les spires de la bobine seront périodiquement soumises à des efforts de traction alternativement de sens contraire : on peut considérer comme générale à tous les alternateurs la production de ce décalage.

Il résulte de ces tiraillements soit l'arrachement, soit la destruction de bobines par le décollement des spires.

Trépidations. — La rotation des alternateurs produit toujours un renflement dû à la dilatation et à la contraction successives des noyaux de fer à chaque variation de flux. Ce ronflement doit être un son continu.

Un défaut de symétrie dans la machine, un manque de tension à la courroie de commande, des à-coups dans la vitesse du moteur produisent des variations dans l'intensité du ronflement.

Remèdes. — En appliquant aux alternateurs ce que nous avons dit à propos des machines à courant continu on pourra localiser les courts circuits et les ruptures de spires.

Les procédés pour réparer sur-le-champ les accidents de peu d'importance seront aussi les mêmes.

La disposition particulière des alternateurs à induit fixe facilite beaucoup ces réparations et si l'enroulement est fait de bobines montées chacune sur un support distinct, et que l'on en ait quelques-unes en réserve, il suffira de peu d'instants pour substituer une bobine neuve à celle qui était détériorée.

— La recherche d'accidents dus à l'excitatrice et la conduite de cette dernière ne seront pas examinées ici, puisqu'il s'agit de courants continus.

Rendement des alternateurs. — Avec une bonne machine, on peut compter sur un rendement électrique de 93 à 96 % et un rendement industriel de 90 à 92 %.

Entretien. — Les prescriptions indiquées pour le cas des dynamos à courant continu sont applicables aux alternateurs, avec cette différence que l'on peut graisser en plein les bagues collectrices. Cette dernière opération peut être faite pendant la marche, mais il ne faut pas se servir d'une burette en métal ; on trempera une baguette de bois dans l'huile et on projettera quelques gouttes du liquide sur les bagues.

Mise en marche. — Il n'y a pas de dispositions particulières à prendre ; on appliquera les principes généraux de conduite d'une machine indiqués pour les dynamos à courant continu.

CHAPITRE VIII

ALTERNATEURS POLYPHASÉS — COUPLAGE ET ACCIDENTS

Alternateurs Polyphasés.

L'enroulement induit des alternateurs ordinaires ne constitue qu'une source unique de force électromotrice et ne donne, par suite, naissance qu'à un seul courant (fig. 94).

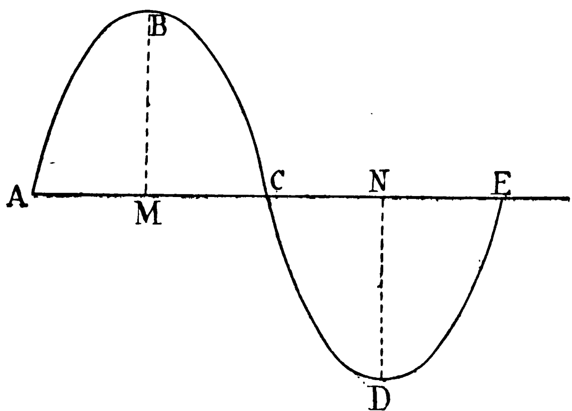


Fig. 94. — Courbe d'un courant alternatif.

On peut, avec un seul alternateur, créer plusieurs sources distinctes de force électromotrice et par suite un nombre égal de courants ; il suffit de faire l'induit en autant d'enroulements qu'il doit y avoir de courants distincts.

Les alternateurs polyphasés sont établis de la sorte et les enroulements induits sont disposés de façon à créer entre les forces électromotrices un décalage convenable déterminé par le nombre de courants à créer.

Si l'on veut avoir trois courants, le décalage sera de

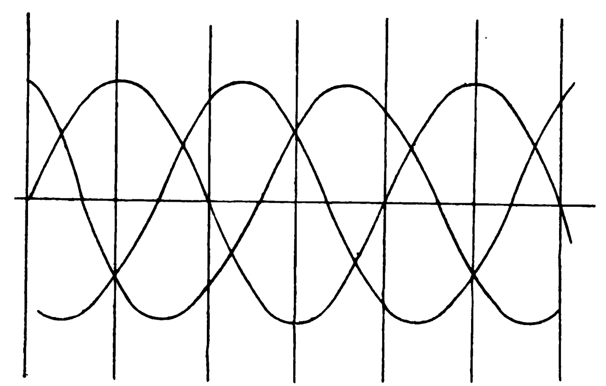


Fig. 95. — Courant triphasé.

un tiers de période (fig. 95) et l'alternateur *triphasé*; pour quatre courants le décalage sera de un quart de période (fig. 96) et l'alternateur dénommé *diphasé*.

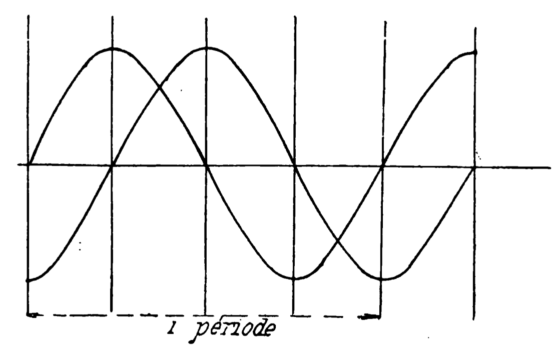


Fig. 96. — Courant diphasé.

Supposons, en effet, un induit I en anneau continu, fermé sur lui-même, tournant entre deux pôles N. S.

Si l'on prend sur cet induit trois dérivations également distantes entre elles, et aboutissant chacune à une bague collectrice *a. b. c.* à frotteur *m. n. o.* montée sur l'arbre, on réalisera un alternateur triphasé dont le circuit extérieur est formé par trois câbles partant chacun d'un frotteur $c.$ c_1 c_2.

En se reportant à ce qui a été dit page 126, on se rendra facilement compte que les forces électromotrices

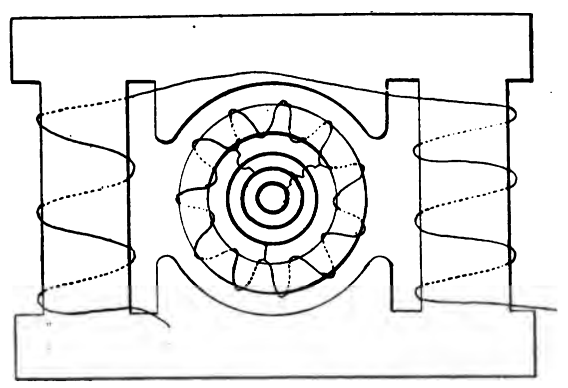


Fig. 97. — Schéma d'une machine à courant triphasé.

créées simultanément dans les trois fractions de l'induit sont deux à deux décalées de 1/3 de période.

Si l'on avait pris quatre dérivations sur l'induit pour faire un alternateur diphasé les forces électromotrices créées dans chaque fraction de l'induit auraient été deux à deux décalées de 1/4 de période. Le collecteur aurait été fait de quatre bagues et le circuit extérieur de quatre câbles distincts.

Principe des alternateurs polyphasés. — Nous n'en-

trerons pas dans le détail de la construction des alternateurs polyphasés dont le principe vient d'être exposé. Nous nous bornerons à rappeler les combinaisons de groupement des bobines induites et, par suite, leurs différents modes de jonction aux bagues collectrices.

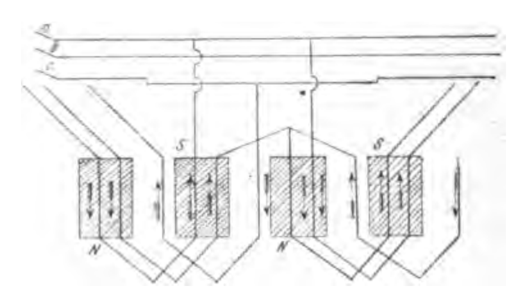


Fig. 98. — Bobinage d'un alternateur triphasé.

L'emploi de trois de courants décalés de 120° étant le plus simple en même temps que le plus employé, pour ne pas dire le seul, les schémas ci-dessous se rapporteront au cas d'un alternateur triphasé.

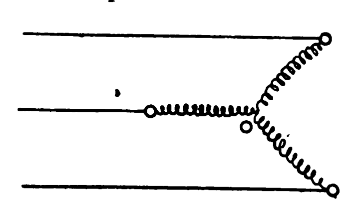


Fig. 99. — Montage en étoile.

Dans les figures ci-contre, les bobines induites sont représentées par un trait sinueux, le balai *b* par un trait perpendiculaire au circuit principal c. c. c.

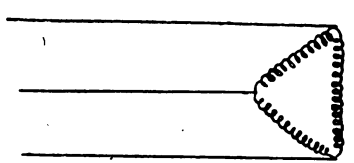


Fig. 100. — Montage en triangle.

Montagne en triangle. — Les extrémités de chaque bobine aboutissent chacune à l'une des bagues collec-

trices. Chaque bague est donc reliée à deux bobines consécutives (fig. 100).

Montage en étoile. — Les bouts finissants des trois bobines sont réunis ensemble tandis que les trois bouts commençants aboutissent chacun à une bague collectrice (fig. 99).

Montage en étoile triangulaire. — Moins employée que les précédentes, cette combinaison permet d'obtenir six phases avec un courant triphasé par le groupement convenable de six bobines (fig. 101).

Trois bobines sont montées en *triangle* et les trois

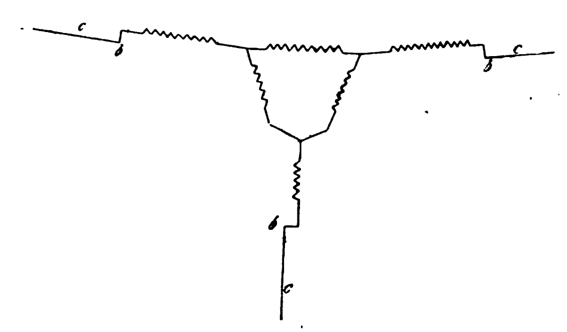


Fig. 101. — Montage en étoile triangulaire.

autres en série avec la ligne, sur les extrémités des trois premières.

— Un alternateur triphasé alimentera donc une ligne composée de trois conducteurs, et comme chacun d'eux sert à tour de rôle de fil de retour et qu'à chaque instant la somme algébrique des courants qui circulent dans la ligne est nulle, les trois conducteurs devront avoir des sections égales.

On verra, plus loin, qu'il y a néanmoins économie

dans le poids de cuivre de la ligne, à employer des courants triphasés plutôt que des courants alternatifs ordinaires.

Couplage et accidents aux alternateurs polyphasés. — Les alternateurs de cette catégorie se couplent de la même manière que les alternateurs ordinaires. On réunit deux à deux les frotteurs des machines, et les fils de ligne partent d'un point pris sur ce conducteur de iaison.

Les accidents procèdent des mêmes causes que dans e cas de machines ordinaires, nous n'y reviendrons pas.

DESCRIPTION D'ALTERNATEURS SIMPLES ET D'ALTERNATEURS POLYPHASÉS

ALTERNATEUR FERRANTI. — L'induit a la forme d'un disque composé d'un certain nombre de bobines élémentaires réunies entre elles bout à bout ; les deux extrémités libres du circuit ainsi constitué sont reliées à deux bagues collectrices.

Fig. 102. — Bobine induite de l'alternateur Ferranti.

Les bobines élémentaires sont enroulées chacune sur un noyau rigide, fait de bandes de laiton disposées en éventail, séparées par une couche d'amiante ; il est fixé dans un bloc de laiton percé d'un trou. L'enroulement induit est formé d'un ruban de cuivre dont les spires sont isolées entre elles par de la fibre vulcanisée. Ce ruban est enroulé sur chacun des noyaux, et ceux-ci sont fixés par paire dans des porte-bobines :

ces derniers constituent une liaison électrique entre chaque bobine, de telle sorte qu'un courant circulant

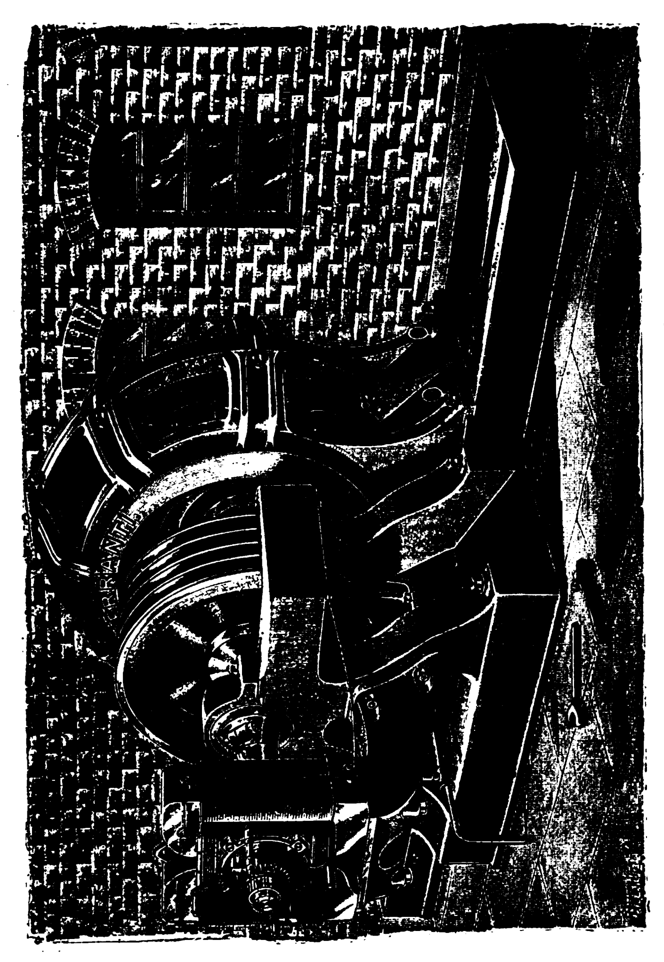


Fig. 103. — Alternateur Ferranti.

dans l'une de l'extérieur à l'intérieur, circulera dans la seconde de l'intérieur à l'extérieur.

Le bout extérieur de chaque paire de bobines est relié au bout correspondant de la paire suivante.

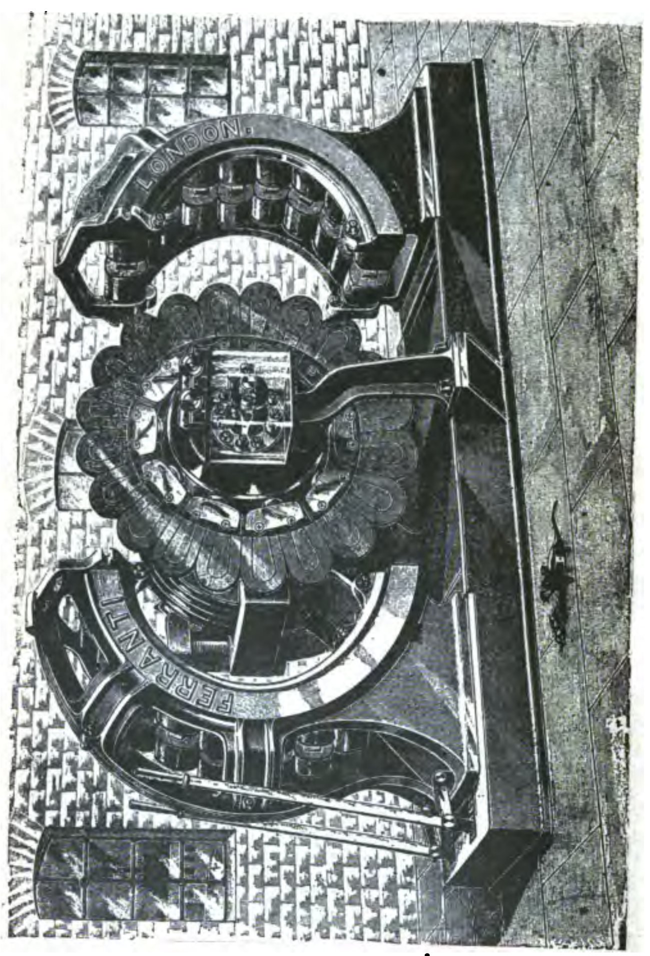


Fig. 104. — Alternateur Ferranti ouvert.

Les porte-bobines sont terminés par une queue filetée qui traverse une bague en porcelaine et est clavetée sur

un plateau résistant faisant fonction de moyeu. Les ouvertures par lesquelles passent la queue filetée et la clavette sont plus larges qu'il ne convient. On les remplit ultérieurement d'un mélange fondu de soufre et de verre pilé qui isole les pièces entre elles en même temps qu'il assure la rigidité de l'ensemble.

Chaque porte-bobines est muni sur le côté d'une ailette qui aide à la ventilation de l'ensemble.

Le collecteur est formé de deux bagues isolées entre elles, fixées sur l'arbre même de l'induit, et sur lesquelles frottent deux demi-anneaux en forme de C reliés chacun à l'une des bornes du circuit extérieur.

Le système inducteur comprend deux couronnes parallèles d'électro-aimants qui se trouvent placées en regard l'un de l'autre, et de polarité alternativement contraire. Le disque de l'induit est monté entre les deux couronnes inductrices.

Le courant d'excitation est fourni par une dynamo à courant continu fixée sur l'arbre même de la machine.

Alternateur triphasé de Brown. — Un type de 300 chevaux produit 3 courants de 1400 ampères chacun sous 50 volts. L'induit est fixe et l'inducteur mobile tourne à l'intérieur.

L'inducteur est formé de 96 barres de cuivre isolées à l'amiante (fig. 105), montées en 3 groupes de 32 barres chacun, et logées dans des trous percés dans les disques du noyau, tout près de sa périphérie.

Les disques du noyau sont estampés en segments et assemblés sur une carcasse de fonte qui peut se mouvoir le long d'une glissière pour permettre les réparations.

L'inducteur ne comporte qu'un seul circuit magné-

tique formé d'une bobine enroulée extérieurement à un noyau et maintenue par deux disques en acier munis chacun de 16 dents ramenées horizontalement. Ces dents, renversées l'une vers l'autre, sont parallèles aux génératrices du noyau. On obtient ainsi des pôles alternati-

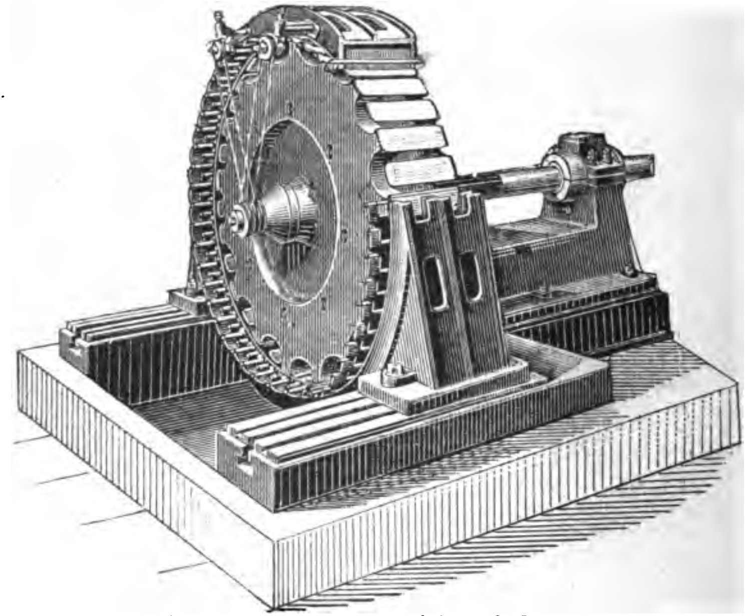


Fig. 105. — Alternateur triphasé de Brown.

vement contraires, par dessus l'enroulement inducteur.

Le courant d'excitation est fourni par une dynamo spéciale et il est conduit à la partie mobile par des cordes métalliques souples entraînées par des poulies isolées.

Les pertes par frottement et hystérésis sont de 3 600 watts et celles dues à la résistance du bobinage induit de 3 500 watts : la perte totale s'établit à 4 %.

CHAPITRE IX

TRANSFORMATEURS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Observations préliminaires

Les lampes ne sont pas toujours alimentées par le courant de la dynamo tel qu'on le recueille à ses bornes, et des considérations de nature variée peuvent obliger à modifier le rapport des constantes de ce courant.

Si,par exemple,la station est à une grande distance du centre de consommation on aura intérêt à produire un courant de très haute tension que des appareils transformeront sur place en un autre de tension convenable pour le service des abonnés.

La même solution permettra de desservir simultanément plusieurs centres éloignés les uns des autres et de l'usine.

D'autre part, si la force motrice dont on dispose est insuffisante pour le service des lampes au moment de la grande consommation, ou si cette force motrice ne peut être utilisée pendant les heures d'éclairage, on emploiera des appareils qui reçoivent l'énergie électrique et l'emmagasinent pour la restituer selon les besoins. Le groupement de ces appareils permet de lancer dans le circuit d'utilisation un courant de tension supérieure

ou inférieure à celui de la dynamo. Ils transforment donc aussi l'énergie électrique.

Les appareils auxquels nous venons de faire allusion diffèrent entre eux par le principe de leur fonctionnement suivant qu'ils se rapportent au premier ou au deuxième cas : ils diffèrent, en outre, par la faculté du second de ne restituer qu'ultérieurement l'énergie qui lui a été fournie. Nous appellerons les premiers *Transformateurs instantanés ;* ils comprennent les transformateurs à courant continu, à courants alternatifs, de courants alternatifs en courant continu.

Les seconds, dits *Transformateurs différés*, sont représentés par les accumulateurs.

TRANSFORMATEURS A COURANT CONTINU

Les transformateurs à courant continu ont pour objet de recevoir de la station centrale un courant de haute tension et de restituer un courant de basse tension dont la puissance sera égale à celle du premier, toutes pertes de transformation étant supposées nulles.

La variation de la force électromotrice est inversement proportionnelle à celle de l'intensité.

C'est ainsi qu'un courant de 2 000 volts 10 ampères peut être transformé en un courant de 200 volts 100 ampères.

Les transformateurs à courant continu sont formés par une dynamo généralement multipolaire, dont l'induit porte deux enroulements distincts : l'un de fil fin recevant le courant de haute tension, l'autre de gros fil produisant le courant de basse tension.

Chacun de ces enroulements aboutit à un collecteur distinct muni d'un nombre convenable de paires de balais.

Le courant de distribution a son origine aux balais de l'un des induits.

L'excitation des inducteurs peut être réalisée par une dérivation sur l'induit à bas potentiel, ou par le courant à haute tension.

Il va de soi que, réciproquement, on peut transformer un courant à bas potentiel et grande intensité en un courant à haut potentiel et faible intensité, en inversant les connexions sur les circuits extérieurs.

Quand on lance le courant à transformer dans la machine, l'induit se met à tourner et la transformation s'opère.

Le mouvement de rotation de l'induit est le défaut principal de ces appareils dont le fonctionnement doit être surveillé, le graissage des paliers entretenu, etc.

Le calage des balais n'a pas à être modifié, les deux induits ayant des réactions sensiblement égales et de signe contraire.

Un transformateur Elwell Parker de 40 kilowatts avait un rendement industriel de 83 °/₀ à pleine charge et de 75 °/₀ à demi charge.

TRANSFORMATEURS A COURANTS ALTERNATIFS — RENDEMENT COUPLAGE — ACCIDENTS — ISOLEMENT

Comparables à une dynamo à induit et inducteur fixes, dans laquelle on fait varier l'aimantation du noyau de fer par l'action d'un courant alternatif, ces appareils

servent à transformer un courant donné en un autre dont les constantes, *intensité* et *différence de potentiel*, prendront une valeur nouvelle, leur produit restant constant, et égal à celui des constantes du courant à transformer.

Un transformateur recevant un courant de 10 ampères sous 2 000 volts pourra restituer un courant de 100 ampères sous 200 volts. En un mot, les variations dans l'intensité et la force électromotrice sont inversement proportionnelles.

En principe, un transformateur comprend 3 parties distinctes :

Un noyau magnétique, en tôle de fer la plupart du temps,

et deux circuits :

Le *primaire*, circuit en série ou en dérivation sur celui de l'alternateur ;

Le *secondaire*, isolé du primaire, en série sur le circuit de distribution.

Le rôle du noyau magnétique est de faire passer au travers des spires du secondaire le flux de force créé par le courant d'excitation dans le primaire.

On construit des transformateurs dont le secondaire porte un certain nombre de prises de courant convenablement réparties suivant les besoins et qui permettent la distribution à 3, 5, 7 fils, et même d'alimenter simultanément des appareils exigeant des différences de potentiel différentes. Ainsi, s'il donne 100 volts entre ses bornes extrêmes 1 et 3, donnera 50 volts entre 1 et 2 et entre 2 et 3 si la prise 2 est au milieu du secondaire. On pourra desservir des lampes à incandescence à 100 volts sur le circuit 1, 3 et des lampes à arc sur des circuits branchés entre 1 et 2 et entre 2 et 3.

Transformateurs pour distribution en série. — Peu employés, sauf en Amérique, ces transformateurs doivent, pour fournir un courant d'intensité efficace constante, présenter un coefficient de self-induction

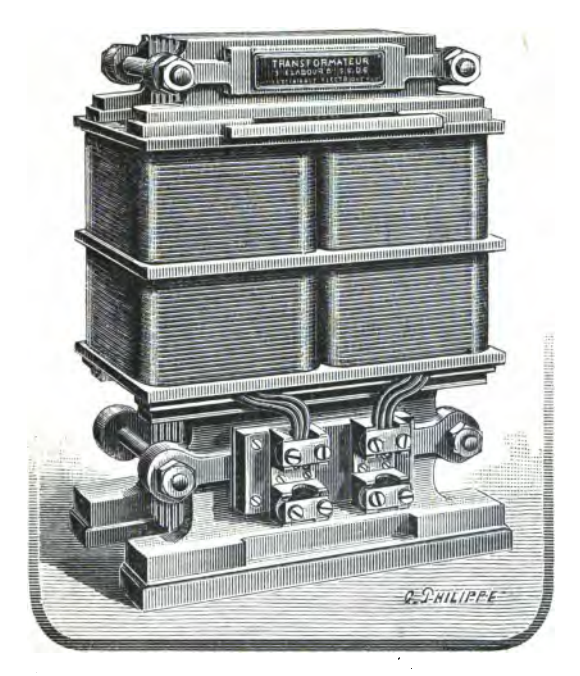


Fig. 106. — Transformateur Labour.

considérable eu égard à l'induction mutuelle des deux enroulements primaire et secondaire.

Les transformateurs à circuit magnétique ouvert répondent à ces conditions, et comme dans le transformateur *Hérisson* de Swinburne, les deux bobines doivent être juxtaposées au lieu d'être superposées.

Transformateurs pour distribution en dérivation. —

Pour fournir un courant d'intensité efficace variable sous une différence de potentiel constante, on emploie

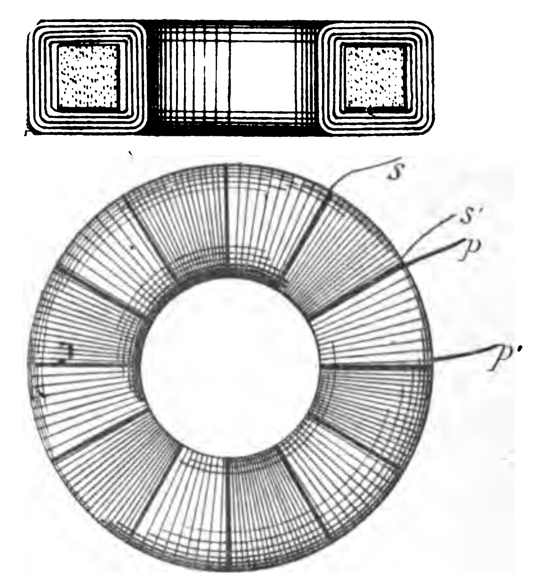


Fig. 107. — Transformateur Zipernowski.

des transformateurs à circuit magnétique fermé, des types Zypernowski, Ferranti, etc...

Les deux enroulements primaires étant branchés en quantité ou en série sur le circuit de l'alternateur, l'on réunit en série les deux circuits secondaires (fig. 108). Si les deux transformateurs sont identiques, on aura entre les deux bornes extrêmes de l'ensemble une différence de potentiel double de celle fournie par chaque transformateur.

Couplage des transformateurs. — Les transformateurs peuvent être couplés.

Séchage des transformateurs. — Le vernis isolant appliqué pendant la construction sur les spires des enroulements n'est généralement pas sec au moment de la livraison, et l'isolement du transformateur s'en ressent.

On doit procéder à un séchage complet avant de mettre l'appareil en service, et l'on peut employer la méthode suivante indiquée par M. Laffargue.

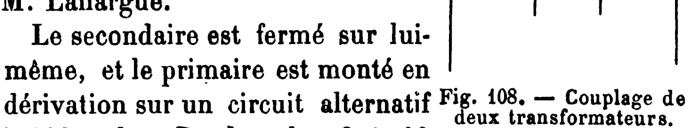


Fig. 108. — Couplage de deux transformateurs.

Le secondaire est fermé sur lui-même, et le primaire est monté en dérivation sur un circuit alternatif à 100 volts. Pendant les 8 à 10 jours que dure ce traitement les enroulements s'échauffent peu à peu.

Le transformateur est ensuite relié à la source à haute tension qui l'alimentera en service, et l'on ferme le secondaire sur une résistance variable (un bac rempli d'eau acidulée ou d'une solution saline) de façon à lui faire débiter 25 °/₀ de plus qu'en régime normal. L'appareil s'échauffe fortement et les dernières traces d'alcool ou d'humidité sont chassées.

Le transformateur peut être considéré comme sec et mis en service si la vérification de l'isolement entre ses diverses parties est reconnue satisfaisante.

L'ensemble de ces opérations exige une quinzaine de jours.

Vérification de l'isolement d'un transformateur. — La résistance d'isolement doit être mesurée :

1° Entre les circuits primaire et secondaire.

2° Entre le circuit primaire et la masse du transformateur.

3° Entre le circuit secondaire et la masse du transformateur.

Elle doit être de plusieurs milliers de mégohms ; on doit employer, pour effectuer ces mesures, une source donnant une différence de potentiel d'au moins 600 à 800 volts aux bornes du transformateur.

Une dernière vérification du bon isolement des deux enroulements entre eux sera faite en montant sur l'alternateur une borne du secondaire et une borne du primaire, et en intercalant un galvanomètre sur le circuit. Un défaut d'isolement se manifesterait par une déviation de l'aiguille du galvanomètre.

Voici les résultats de mesures d'isolement faites à l'usine des Halles :

Transformateur Ferranti de 7,5 kilowatts à 430 volts :		
Isolement entre le primaire et le secondaire. .	3 à 10	mégohms
— — — — fer . .	300 à 760	—
— — secondaire — . .	300 à 800	—
Transformateur Ferranti de 3,5 kilowatts à 430 volts :		
Isolement entre le primaire et le secondaire. .	2 à 15	mégohms
— — — — fer . .	750 à 2200	—
— — secondaire — — . .	550 à 2300	—
Transformateur Ferranti de 2 kilowatts à 430 volts :		
Isolement entre le primaire et le secondaire. .	8 à 24	mégohms
— — — — fer . .	900 à 2850	—
— — secondaire — — . .	2500 à 2850	—

TRANSFORMATEURS A COURANTS POLYPHASÉS

Les courants polyphasés se prêtent à la transformation comme les courants alternatifs simples, mais les

transformateurs polyphasés comprendront autant d'enroulements primaires et secondaires que la ligne aura de fils, soit trois primaires et trois secondaires dans le cas de courants triphrasés (fig. 109).

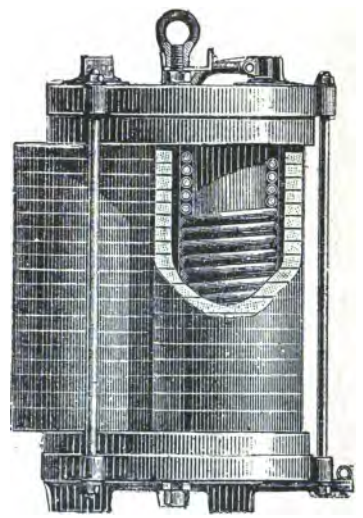


Fig. 109 — Transformateur triphasé de Brown.

Pour le montage, le couplage, l'entretien et l'étude des accidents, nous prions le lecteur de se reporter à ce qui a été dit pages 249 et suivantes.

L'emploi des courants de très haute tension, 10 000, 15 000 volts, ne peut être réalisé qu'avec des transformateurs isolés dans des conditions spéciales.

Les différents enroulements sont, avant leur montage, imprégnés de paraffine, et le transformateur est maintenu noyé dans un bain d'huile.

CHAPITRE X

ACCUMULATEURS

Les accumulateurs sont des appareils dont certains organes changent de composition chimique quand on les fait traverser par un courant continu dit *courant de charge*, et qui restituent ultérieurement l'énergie qu'ils ont reçue, sous forme de courant de décharge, en reprenant leur composition primitive.

Ils accumulent donc l'énergie électrique, d'où leur nom.

Le plomb et ses oxydes forment la matière électrolysable des accumulateurs industriels. D'autres métaux ont été employés, mais leur usage ne s'est pas répandu.

Classification des accumulateurs au Plomb. — On les divise en deux catégories :

Accumulateurs genre Planté.

Accumulateurs à matière active.

Accumulateurs genre Planté. — Une série de lames de plomb sont disposées parallèlement sans se toucher dans un bac renfermant de l'eau additionnée d'un dixième d'acide sulfurique. Elles sont réunies deux à deux, de façon à former des groupes dont chaque lame est comprise entre celles des groupes voisins (fig. 110).

Si l'on réunit les bornes d'une dynamo à deux groupes ainsi formés et que l'on fasse passer le courant, l'eau acidulée sera décomposée ; son oxygène se portera sur le groupe de plaques réuni à la borne + de la dynamo

et recouvrira leur surface d'oxyde puce de plomb PbO^2, et l'hydrogène se dégagera le long des plaques reliées à la borne — .

Si l'on coupe le courant de la dynamo et que l'on mette

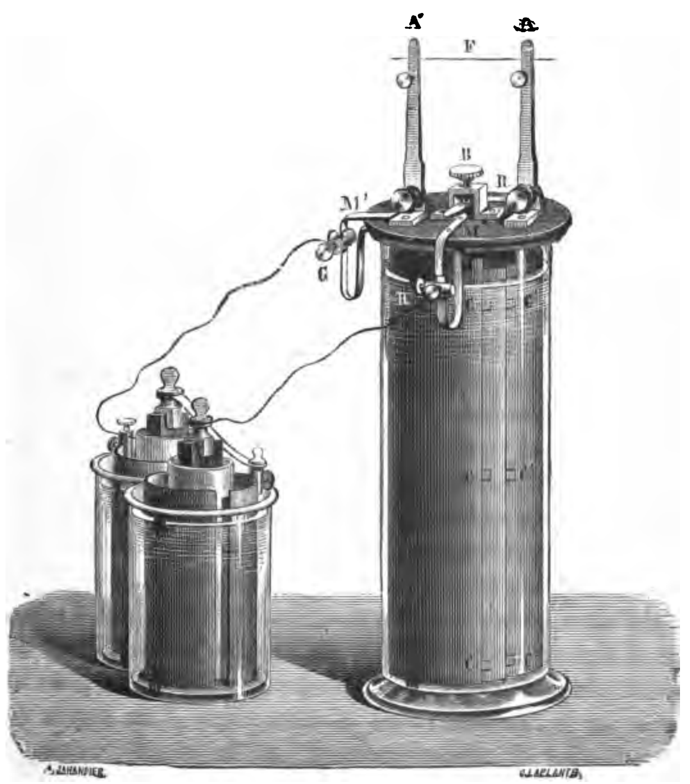


Fig. 110. — Accumulateur Planté.

en circuit l'accumulateur sur un galvanomètre, on observera la production d'un *courant de décharge* de sens contraire au *courant de charge*, en même temps que l'eau

acidulée se décomposera : l'hydrogène naissant réduira l'oxyde PbO^2 en protoxyde de plomb qui se transformera en sulfate, tandis que l'oxygène électrolytique et l'acide sulfurique du bain donneront également sur l'autre groupe de plaques du sulfate de plomb.

Lorsque tout l'oxyde PbO^2 a été réduit, le courant de décharge cesse.

Pendant la décharge, la différence de potentiel entre deux plaques, ou *élément*, est de 2 volts environ.

La durée du courant de décharge étant d'autant plus longue que la couche de d'oxyde PbO^2 est plus épaisse, on cherche à donner à celle-ci la profondeur maximum en chargeant et en déchargeant un très grand nombre de fois l'accumulateur. Au bout d'un certain nombre de charges et de décharges successives, l'épaisseur de la couche d'oxyde ne varie plus sensiblement. Ce traitement s'appelle formation.

Les accumulateurs genre Planté présentent deux inconvénients : leur *formation* exige plusieurs mois, et la somme d'énergie accumulée par kg de plaques est peu élevée.

Un accumulateur Planté renferme une énergie de 3 300 kilogrammètres par kilogramme de plaque.

Accumulateurs à matière active. — Créés par Faure, ils diffèrent des précédents en ce que l'oxyde PbO^2 ne prend plus naissance par l'attaque d'une lame de plomb, mais par la décomposition électrolytique d'un oxyde de plomb déposé mécaniquement sur la plaque avant la mise de l'accumulateur en formation.

Cette disposition a pour avantages d'abréger à quelques jours la durée de la formation et de tripler environ l'énergie renfermée dans 1 k de plaques : ce dernier point est la conséquence d'une transformation

plus profonde de l'oxyde de plomb ou *matière active.*

Fabrication d'un accumulateur à matière active. — Les plaques ne sont plus pleines et plates, elles sont soit percées d'une multitude de trous qui leur donne l'aspect d'une toile métallique à larges mailles ; dans certains types elles sont striées sur une certaine profondeur (fig. 111 à 113).

La matière active sera déposée soit à l'intérieur des *mailles* du quadrillage, soit dans les creux des cannelures.

La carcasse de la lame est un alliage de plomb, d'entimoine et de mercure. L'addition de 6 à 7 °/₀ d'antimoine a pour effet de donner de la dureté au plomb, et celle de mercure, 1,5 °/₀, de rendre l'alliage moins attaquable par l'acide sulfurique.

La matière active destinée aux plaques positives est faite d'un mélange de minium et d'acide sulfurique, celle des plaques négatives, de litharge et d'acide sulfurique.

On pétrit chacun de ces oxydes de plomb avec l'acide sulfurique et l'on bourre du mélange pâteux les mailles ou stries de leurs plaques respectives. Après quelques heures, le minium Pb^3O^4 s'est partiellement décomposé et la matière active se trouve formée d'un mélange de minium, d'oxyde puce de plomb PbO^2, de sulfate de plomb et d'eau.

Sur les plaques négatives, la litharge PbO et l'acide sulfurique ont donné du sulfate de plomb.

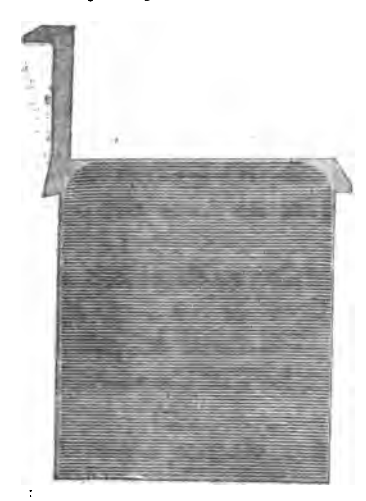
La matière active représente environ 1/3 du poids total de la plaque.

Quand ces deux réactions sont terminées on commence la formation.

Le courant de charge transforme sur les plaques posi-

tives le minium non décomposé et le sulfate de plomb en oxyde puce PbO_2 ; son action sur le sulfate de plomb des plaques négatives produit du plomb métallique spongieux.

Pour transformer 1 kg de minium ou oxyde puce et 1 kg, de lithage en plomb il faut respec-



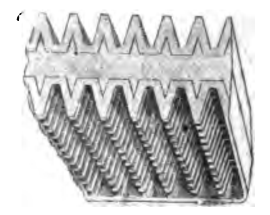


Fig. 111. — Plaques de l'accumulateur Tudor.

tivement 157 et 241 ampères heure, en théorie, et 25 % de plus en pratique.

La formation s'opère par charges et décharges successives.

Pendant la décharge, la matière active des deux plaques se transforme en sulfate de plomb, qu'un nouveau courant de charge ramènera en oxyde de plomb et plomb métallique.

Fig. 112. — Plaque de l'accumulateur Tudor.

Composition de l'eau acidulée. — Les plaques bai-

gnent dans de l'eau additionnée de 1/10 d'acide sulfurique *pur*, exempt d'acides chlorhydrique et nitrique : il faut exactement 1 partie d'acide pour 9 parties d'eau.

Force électromotrice des accumulateurs. — Pendant la période de charge, la force électromotrice de l'accumulateur atteint 2,5 volts par élément.

Si la décharge suit immédiatement la charge, pendant les premiers instants, la force électromotrice reste à 2,10 — 2,15 volts, puis elle tombe rapidement à 2 volts et conserve cette valeur pendant presque toute la durée de la décharge. Vers la fin elle baisse graduellement jusqu'à 1,85 volt ; à ce moment l'accumulateur est déchargé, il faut le retirer du circuit.

Disposition générale d'une batterie. — Une batterie est formée d'un récipient contenant un certain nombre d'*accumulateurs* ou *éléments* plongés dans la solution d'acide sulfurique.

Un élément comprend deux plaques, une positive et une négative en principe, mais en pratique 3 plaques, une positive et deux négatives. La plaque positive travaille par ses deux faces et pour la mieux utiliser on l'intercale entre les deux négatives.

Une batterie sera donc formée de $2n$ plaques positives et de $2n + 1$ plaques négatives : les deux plaques extrêmes sont négatives.

Les plaques positives sont reliées à une borne commune ; il en est de même pour les négatives.

Le mode de connexion des plaques entre elles varie suivant le type d'accumulateur.

Dans certains, chaque plaque est isolée : le long des bords de la cuve courent deux barres : à l'une on relie les négatives, à l'autre les positives.

Certains accumulateurs sont formés de plaques positives, et de négatives, *doubles*, c'est-à-dire de deux plaques

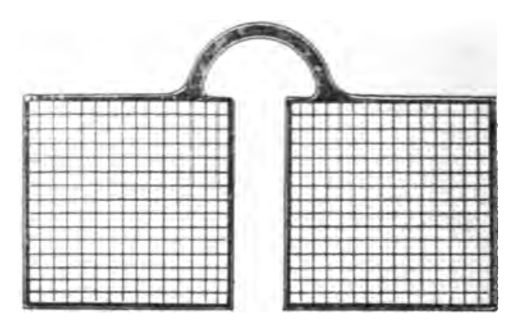


Fig. 113. — Plaques jumelles,

réunies par un pont. Une batterie comprend donc forcément deux récipients (fig. 113 et 114). On place successivement une paire de négatives plongées chacune dans un bac, puis une paire de positives, et ainsi de suite.

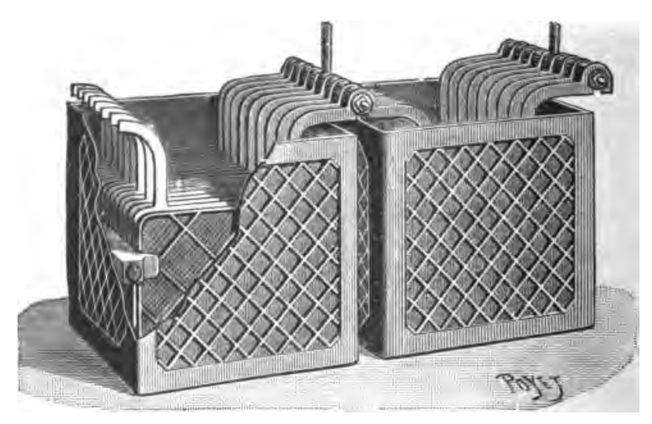


Fig. 114.

Le raccord des plaques aux barres se fait soit par sou-

dure, soit en pressant à l'aide d'une pince contre la barre une queue en plomb qui prolonge chaque plaque.

Récipients. — Plaques et eau acidulée sont contenues dans des bacs qui doivent être parfaitement étanchés en même temps que résistants.

Différentes matières ont été appliquées à leur construction ; nous allons les passer en revue en indiquant les qualités et les défauts de chacune.

Bois goudronné. — Ces récipients économiques donnent des mécomptes, l'acide décomposant le goudron et les résines en acides gras.

Grès. — On utilise souvent des cuves en grès enduites de bitume de Judée ou d'un vernis inattaquable aux acides.

Il est très rare que ces bacs ne présentent pas de fuites.

Leur prix est relativement peu élevé.

Ébonite. — Si le bac est maintenu à température à peu près constante, tout ira bien ; mais un coup de soleil peut faire éclater les parois de la cuve.

L'ébonite bien préparée est d'un prix élevé.

Bois doublé de plomb. — D'un prix élevé ces récipients rendront de bon services si le bois employé à leur construction est bien sec : autrement il jouerait et crèverait la feuillure de plomb.

La cuve est garnie intérieurement de feuilles de plomb assemblées par soudure autogène.

Verre. — Ces récipients doivent être préférés aux autres si la dimension des plaques le permet et si l'on n'a pas à redouter leur fragilité.

D'un prix peu élevé, ils isolent très bien, sont étanches et permettent de surveiller l'intérieur de la batterie.

Séparateurs. — Les plaques sont maintenues à leur distance respective par des séparateurs en ébonite, verre, ou porcelaine (fig. 115).

Ce sont des sortes de peignes en ces différentes ma-

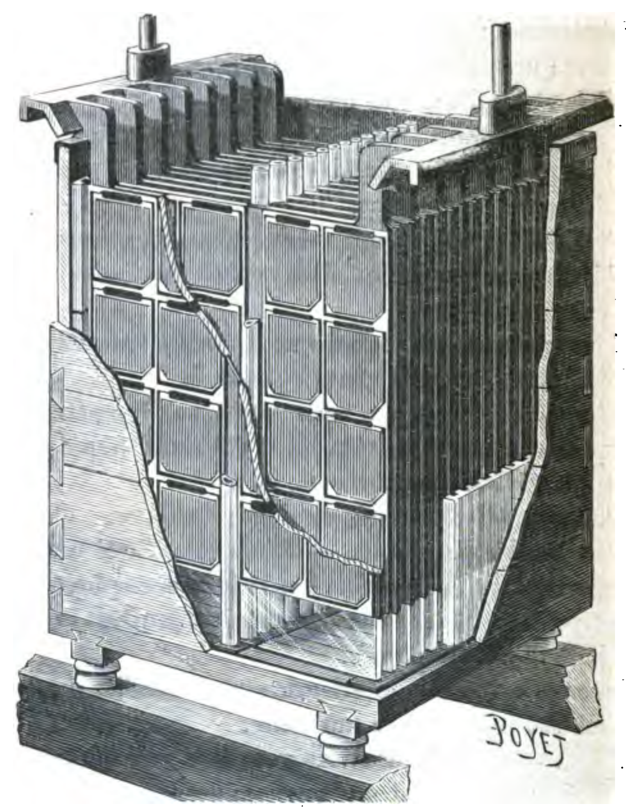


Fig. 115. — Plaques et séparateurs Tudor.

tières, à large base ; les plaques sont placées entre les dents.

La base du séparateur doit être assez haute pour que les plaques ne puissent venir en contact avec les débris qui tombent au fond de la cuve.

Dans certains types les cuves portent de chaque côté une série de rainures dans lesquelles on intercale les plaques dont le bas repose sur deux règles en matière isolante.

Pour éviter que deux plaques ne viennent en contact en se gondolant, on intercale entre elles une réglette de verre, d'ébonite. Dans les très petits accumulateurs on se contente parfois d'enrouler sur une plaque deux anneaux de caoutchouc qui forment tampon ; cette disposition est défectueuse par suite de l'altération du caoutchouc.

On le prépare en versant l'eau, dans une cuve de grès ou de bois doublé de plomb, puis l'acide peu à peu, et en remuant sans cesse avec une tige de bois.

Il ne faut pas verser l'eau sur l'acide.

Quand le liquide est refroidi on peut le mettre dans les accumulateurs.

Assemblage des plaques. — Deux moyens sont utilisés. Le premier consiste à presser fortement, avec un écrou à deux têtes, la *queue* de chaque plaque sur la barre correspondante qui court le long du bac.

Chaque bac porte ainsi deux barres, faites d'un alliage de plomb et d'antimoine, perpendiculaires aux plaques. A l'une des barres on relie les plaques + et à l'autre les plaques —. A cet effet, les queues sont percées à leur extrémité et les barres le sont aussi, en face de chaque plaque (fig. 119).

On assemble ces deux pièces par un écrou à deux têtes et l'on recouvre la jonction de paraffine pour éviter

l'attaque de la surface de contact de la prise de courant.

Ce moyen est le meilleur parce qu'il permet d'enlever,

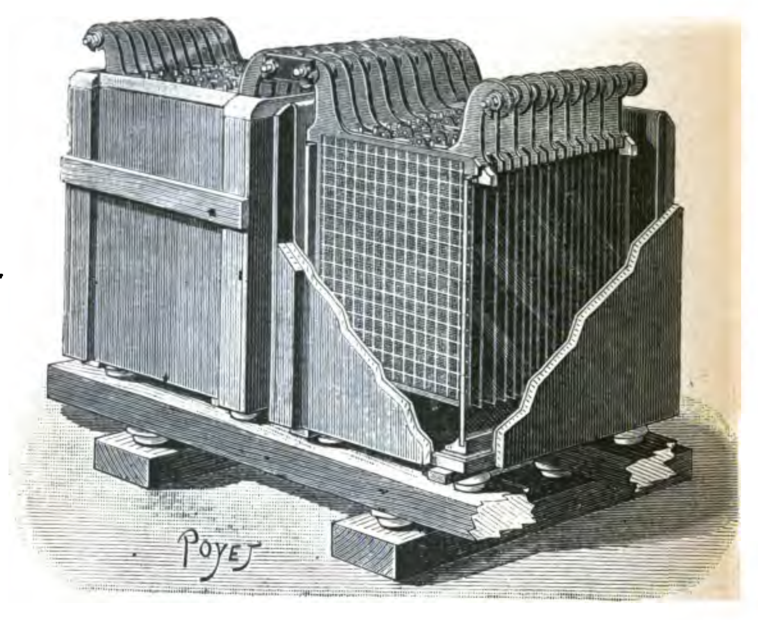


Fig. 116.

même pendant la marche, des plaques devenues défectueuses (fig. 116).

Le second procédé consiste à souder ensemble plaques et barres.

Montage des accumulateurs. — Les plaques et les récipients arrivent emballés séparément, et doivent être brossés et nettoyés avec soin avant le montage.

La batterie doit être placée dans un local sec et bien

aéré, pour éviter l'accumulation des gaz tonnants : si son importance le comporte, un ventilateur renouvellera l'atmosphère.

Il est de toute nécessité que l'isolement des accumulateurs soit aussi parfait que possible, et l'on n'obtiendra ce résultat que par des soins journaliers. Vers la fin de la charge, l'explosion des bulles de gaz à la surface du liquide lance une pluie fine d'eau acidulée dont une partie retombe sur les parois des bacs et coule au sol en formant autant de dérivations. On évitera ces pertes, en grande partie du moins, en faisant reposer les pieds des bacs sur des isolateurs à garde d'huile.

Il est préférable que la batterie, et par suite, les isolateurs à garde d'huile ne reposent pas directement sur le sol : on dispose à terre des madriers enduits à chaud d'un mélange à parties égales de goudron et d'essence de térébenthine qui supporteront l'ensemble.

Quelquefois, la batterie doit être répartie en plusieurs étages superposés si le local est exigu. On établit alors en charpente solide, imprégnée du mélange de térébenthine et de goudron, une série de rayons superposés. Leur ensemble est supporté par un nombre convenable de pieds qui reposent aussi sur des isolateurs à garde d'huile.

La hauteur entre deux rayons doit être suffisante pour permettre d'enlever et de remettre commodément les plaques.

DESCRIPTION DE QUELQUES ACCUMULATEURS

Le montage des plaques dans leurs bacs respectifs, et leur jonction aux barres collectrices se fait à terre. L'ac-

cumulateur est ensuite mis en place soit sur madriers, soit sur le rayon du casier. On remplit les bacs du mélange d'eau et d'acide sulfurique de façon à couvrir complètement les plaques.

Généralement, les queues des plaques + et leurs barres collectrices sont peintes en rouge. Les parties correspondantes des plaques — sont peintes en noir.

Dans la plupart des cas, les éléments de chaque accumulateur sont montés en tension.

Pour atténuer la déperdition du liquide par l'explosion des bulles de gaz pendant la charge et la décharge, on recouvre la surface libre du liquide d'une couche d'huile lourde de pétrole. On peut aussi y couler de la paraffine chaude, et, quand celle-ci a fait prise, on perce plusieurs trous pour permettre l'évacuation des gaz, et l'on soutire un peu de l'électrolyte pour créer un espace libre entre le liquide et la paraffine.

Une bonne précaution consiste à enduire les rebords de la cuve d'une couche de paraffine pour atténuer les dérivations au sol.

On procède ensuite au couplage des accumulateurs entre eux en vue du service, à moins que l'on ne réunisse chaque accumulateur ou groupe d'accumulateurs à un *réducteur*, appareil qui permet de modifier le couplage pendant la charge et la décharge.

L'emploi des *réducteurs* étant devenu général, nous donnerons au Tome II la description des principaux modèles de réducteurs.

La description d'une batterie de 3 200 ampères-heures de capacité complètera les renseignements ci-dessus; nous avons choisi l'accumulateur Tudor parce que c'est l'un des meilleurs que l'on construise (fig. 117).

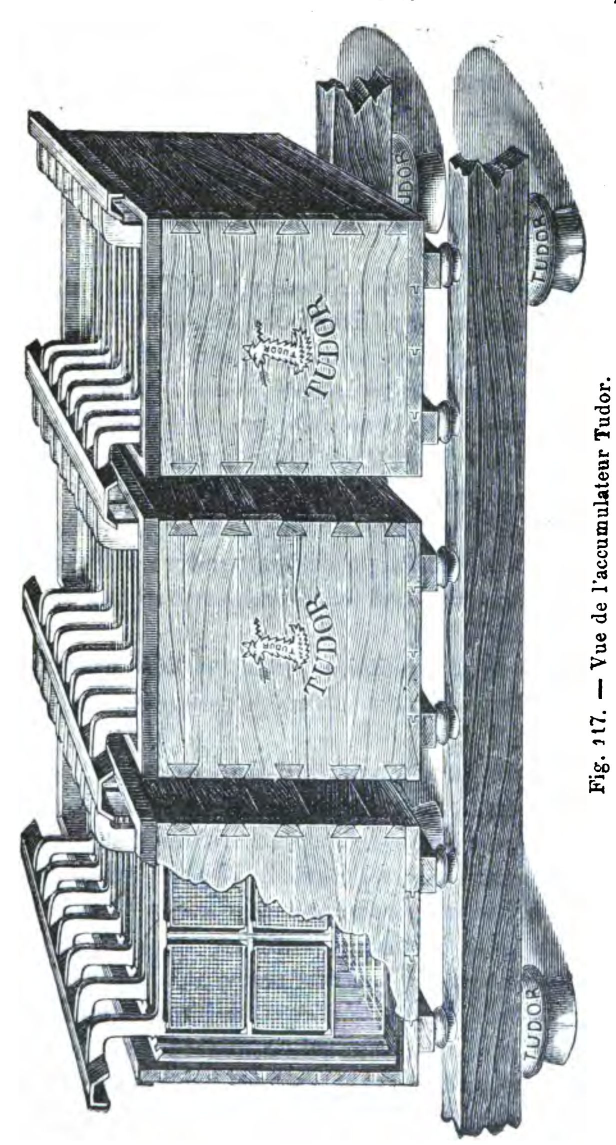


Fig. 117. — Vue de l'accumulateur Tudor.

La batterie d'accumulateurs comprend 68 éléments du système Tudor, désignés au tarif de la *Société Tudor* sous le N° 22.

Chaque élément comprend 10 électrodes positives et 11 électrodes négatives. Chaque électrode se compose de 4 plaques unitaires, assemblées entre elles, à la soudure autogène.

Le plan ci-annexé donne une vue de l'élément Tudor, et du mode de montage des électrodes. Celles-ci reposent sur une lame de verre, hors du liquide, et un grand intervalle, au fond du récipient, permet le logement facile des oxydes qui viennent à tomber. Entre les plaques existe un intervalle de 4 centimètres, maintenu au moyen de tubes de verre.

Le récipient est de bois imprégné, revêtu d'un épais doublage de plomb assemblé à la soudure autogène.

Les connexions sont de plomb pur et ont une très forte section.

Chaque plaque unitaire positive pèse 8k ,800 ; une plaque unitaire négative pèse 6 kg ; la paire de plaques pèse donc 14k ,800.

La capacité d'une plaque unitaire est de cent ampères-heures au régime de décharge 10 ampères ; cette capacité va en diminuant avec un régime croissant de décharge : à 24 ampères, la capacité est de 72 ampères-heures. Ce dernier régime est encore considéré comme normal, et il peut en être fait un usage quotidien sans qu'il en résulte aucune détérioration, aucune usure prématurée.

En cas de nécessité, la plaque unitaire supporte sans fatigue un débit exceptionnel de 32 ampères.

La plaque Tudor est constituée spécialement en vue des batteries à poste fixe pour stations centrales. La sur-

face est très développée, et, sans qu'il y ait de matière superflue, rien n'a été ménagé pour en faire un électrode robuste.

En principe, la plaque Tudor est une plaque Planté dont la capacité est provisoirement complétée par l'adjonction d'oxydes de plomb. Ces derniers étant fatalement condamnés à se désagréger, à perdre toute action et à abandonner leur support, il résulterait de ce phénomène une diminution graduelle de la capacité jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'un squelette inerte, sans aucun effet utile. Mais dans le système Tudor, ce squelette ne sert pas seulement à supporter les oxydes de plomb, il joue lui-même un rôle actif en vertu de sa formation Planté ; en outre, celle-ci se complète graduellement par l'usage quotidien, de telle sorte que la capacité ne subit aucune réduction, pendant ou après la chute des oxydes.

Chaque partie de la plaque a une épaisseur telle que le fonctionnement régulier dans l'eau acidulée sulfurique pur ne peut suffire à l'oxyder complètement, et qu'au bout de plusieurs années, il reste encore une âme métallique conservant à la plaque sa forme et ses fonctions primitives.

Le rendement de l'accumulateur Tudor est dû : 1° aux précautions prises dans le montage des électrodes pour qu'aucune dérivation ne puisse être établie par la chute des oxydes ; 2° au grand développement de la plaque, qui la met en contact intime avec toute la matière active ; 3° au soin apporté dans le choix des matières constituantes, plomb, oxydes, acide sulfurique, eau distillée.

La sécurité de marche des batteries Tudor tient au mode de connexion à la soudure autogène, entre les plaques d'un élément et entre les éléments voisins. Au-

cune rupture du circuit, aucune résistance insolite ne peut résulter de l'attaque de l'acide ou du mauvais serrage d'un écrou.

CAPACITÉ — RENDEMENT — COUPLAGE — ENTRETIEN ACCIDENTS — REMÈDES

Résistance intérieure d'un accumulateur. — Elle varie de 1 ohm à quelques centièmes d'ohm *par élément*, suivant les dimensions des plaques, la distance qui les sépare, la nature de leur surface et la composition de l'eau acidulée.

La formule :

$$R = \frac{0{,}08}{p}$$

donne en ohms, d'une façon empirique, la résistance intérieure d'*un* élément dont les deux plaques pèsent p kg.

Régime de charge. — On désigne ainsi l'intensité normale du courant de charge. Indiquée par le fabricant, et variable d'une marque d'accumulateur à une autre, elle est évaluée en *ampères* par *kilogramme de plaque*, ce dernier nombre représentant le *poids d'une plaque*.

Elle varie de 0,5 à 2 ampères par kg.

Régime de décharge. — L'intensité normale du courant de décharge est exprimée aussi en ampères par kg de plaque, ce dernier chiffre se rapportant à une seule plaque.

Elle varie, suivant les types, de 2 à 3 ampères.

Les chiffres indiqués ci-dessus comme régimes nor-

maux de charge et de décharge ne sont pas absolus ; on verra plus tard qu'il y a inconvénient à les prendre plus élevés.

Capacité spécifique. — Elle représente, évalué en ampères-heures par kilogramme de plaque, le nombre de coulombs qu'une plaque du poids de 1 kg restituera.

Elle est de 10 à 22 ampères-heures par kg soit 5 à 11 ampères par kg formé de 0,5 kg de plaque + et de 0,5 de plaque — .

La capacité spécifique varie d'abord d'un type d'accumulateur à l'autre, puis, pour un même type, avec la construction de la plaque suivant l'usage auquel elle est destinée : plus l'intensité du courant de décharge est grande, plus la capacité spécifique baisse.

Énergie spécifique. — Ce facteur représente en *watts-heure par kilogramme*, l'énergie que l'accumulateur peut fournir en marche normale.

Elle subit les mêmes causes de variation que la capacité spécifique et s'établit à 30 à 40 watts-heure par kil.

Rendement d'un accumulateur. — Les accumulateurs sont des transformateurs encore bien imparfaits, pour lesquels on doit considérer :

Le rendement en quantité.

Le rendement en énergie.

Le *Rendement en quantité* est le rapport du nombre de coulombs restitués à la décharge Q au nombre de coulombs Q_1 fourni par la charge. Il a pour expression :

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{\int_0^T idt}{\int_0^{T'} i'dt}.$$

i. T et *i. T'* désignent réciproquement l'intensité de la durée de la charge et de la décharge.

Le *Rendement en énergie* a pour expression :

$$\frac{W}{W_1} = \frac{\int_0^T eidt - \int_0^T Ri^2dt}{\int_0^{T'} e'i'dt + \int_0^{T'} R'i'^2dt}$$

où : *e. é* représentent la différence de potentiel aux bornes pendant la décharge et la charge, T. T' les durées de décharge et de charge et R. R' la résistance de la batterie pendant ces deux opérations.

C'est le rapport du nombre de watts restitués par la décharge ou nombre de watts fournis par la charge.

Mesure du rendement d'une batterie. — La méthode suivante est suffisamment précise et elle a l'avantage de pouvoir être employée dans toute installation qui possède un voltmètre et un ampèremètre.

On commence par charger la batterie à son régime normal, et à des intervalles de temps réguliers et aussi rapprochés que possible on mesure l'intensité du courant de charge et la différence de potentiel aux bornes. On se servira, si l'on en possède, d'un ampèremètre et d'un voltmètre enregistreurs.

En ne considérant que les indications de l'ampèremètre simple ou enregistreur, on trouvera le nombre de coulombs Q_1 fournis par la charge.

Les indications combinées de l'ampèremètre et du voltmètre donneront la valeur en watts de l'énergie envoyée dans la batterie.

Il faut ensuite décharger la batterie sur une résistance

convenable et lui faire débiter son courant normal ; le plus simple pour réaliser cette résistance est de relier les bornes de la batterie à deux plaques de cuivre plongées dans un bac rempli d'une solution à 5 °/₀ de sulfate de cuivre. On éloigne ou rapproche les plaques l'une de l'autre de façon à maintenir l'intensité constante.

Au moyen des mêmes appareils que pour la charge, on mesure à des intervalles égaux et rapprochés l'intensité et la différence de potentiel aux bornes où l'on monte en circuit un ampèremètre et un voltmètre enregistreurs.

On obtient les valeurs de Q_1 et de e', et en même temps de R et de R'.

On a donc tous les éléments pour établir le rendement d'une batterie en *quantité* ou en *énergie*.

En pratique, on doit compter sur un rendement de 80 °/₀ en *quantité* et de 60 à 70 °/₀ en *énergie*.

A titre d'indication des résultats à obtenir d'une batterie suivant les conditions de charge et de décharge, voici le résumé des expériences faites au Laboratoire Central d'Electricité sur des accumulateurs Julien, type 1892, à matière active perforée.

Opérations	Durée en heures	Courant en ampères	Densité du courant par kilogramme	Différence de potentiel aux bornes en volts	Capacité en ampères-heure	Énergie en watts-heure	Capacité spécifique en ampères-heure	Énergie spécifique en watts-heure
Charge	16	30	1,42	2,37	060	13,28	22,0	03,3
Décharge	19,5	24,0	0,98	1,97	477,0	9,39	19,2	37,8
Charge	15	46	1.40	2,30	040	12,39	21,6	49,7
Décharge	11,75	37	1,49	1,97	432	8,03	17,4	34,3
Charge	12,5	40	1,60	2,34	498	11,67	20	46,8
Décharge	5,5	66	2,60	1,90	362	6,87	14,0	27,6
Décharge supplémentaire	3,70	20	1	1,91	94	0,80	3,8	7,2

Couplage des accumulateurs. — Les batteries d'accumulateurs se couplent entre elles comme des piles :

En série : en réunissant le pôle — de l'une au pôle — de la suivante et ainsi de suite : les deux pôles restés libres étant de signe contraire.

En *dérivation* — en réunissant ensemble d'une part les pôles + et d'autre part les pôles — des différentes batteries. Le circuit extérieur part de ces pôles groupés.

Couplage mixte. — On peut enfin coupler en quantité des groupes de batteries montées en série entre elles et réciproquement.

Il faut toutefois noter que dans un couplage en série l'intensité du courant est la même sur tout le circuit, et que, par suite, ne peuvent être normalement couplés de la sorte que des accumulateurs dont le régime de charge ou de décharge est à peu près le même.

La même observation s'applique au groupement en série pour la décharge.

Charge des accumulateurs. — La batterie chargée possédant une force électromotrice inverse de celle du courant de charge, il en résulte que la dynamo devra toujours fournir aux bornes de la batterie une force électromotrice supérieure à celle des accumulateurs : en pratique l'écart est de 20 %, c'est-à-dire qu'aux bornes d'un élément la différence de potentiel fournie par la dynamo devra être de :

$$2,5 + 0,25 = 2,75 \text{ volts}$$

et aux bornes de n éléments en série de :

$$n\,(2,5 + 0.25) = n \,.\, 2,75 \text{ volts.}$$

L'existence de cette force contre électromotrice s'oppose donc à l'emploi pratique de dynamos série pour la charge des accumulateurs ; un ralentissement du moteur, un glissement de la courroie pouvant amener une inversion de polarité des inducteurs du fait de la décharge de la batterie sur la dynamo.

Les machines excitées en dérivation ne présentent pas cet inconvénient et doivent être exclusivement employées.

Entretien des accumulateurs. — On devra chaque jour, pendant la charge et la décharge :

1. — Assurer la ventilation de la salle, et ne pas pénétrer dans le local avec une lumière, si pour une cause quelconque les ouvertures avaient été closes.

2. — Essuyer les parois des cuves pour enlever les gouttelettes d'eau acidulée condensées à leur surface.

3. — Essuyer avec soin les parois des isolateurs qui supportent les cuves pour empêcher les dérivations au sol, ainsi que les madriers ou rayons qui supportent les batteries.

4. — Vérifier si les connexions des plaques avec les barres subsistent toujours, et si les points de jonction n'ont pas été attaqués par les vapeurs acides. Renouveler au besoin l'enduit de paraffine qui les recouvre.

5. — Mesurer chaque jour la hauteur du liquide et la ramener à son niveau normal par addition d'eau acidulée s'il y a lieu.

6. — Ramener à sa densité normale l'électrolyte dont l'eau s'évapore par l'échauffement dû tant aux réactions chimiques dont il est le siège qu'au passage du courant. Rappelons que sa densité doit être de 1,150 et de 1,220 respectivement avant et après la charge.

7. — Agiter de temps à autre le liquide entre les plaques pour maintenir sa composition homogène.

La non homogénéité de l'électrolyte déterminerait des densités de courant variables d'un point à l'autre de la plaque, d'où, la production d'une réaction chimique trop intense en certains points, déformation de la plaque et désagrégation de la matière active.

8. — S'assurer que les plaques ne portent pas sur les parois du bac si celui-ci n'est pas en verre ou ébonite.

En outre de ces prescriptions à suivre chaque jour, il y a lieu de temps à autre de vérifier si chaque élément fonctionne normalement.

Cette vérification, quand la batterie est chargée, se fait avec un voltmètre allant jusqu'à 3 volts et gradué en dixièmes de volt.

On met successivement en circuit chacun des éléments et on lit sur le voltmètre la différence de potentiel réelle qui doit être comprise entre 2,3 et 2,5 volts.

Si cette dernière était inférieure à 2,3 volts il faudrait retirer les plaques de la cuve et rechercher la cause d'affaiblissement.

Tous les deux ou trois mois, on retire les plaques des cuves, on brosse énergiquement plaques et cuves et l'on renouvelle l'eau acidulée.

On emploie à cet effet une brosse en fil de fer, telle que les *cardes*. Les plaques positives, qui s'altèrent plus rapidement que les négatives, doivent être brossées jusqu'à disparition du dépôt blanc qui masque leur couleur primitive, puis lavées à l'eau acidulée, l'eau ordinaire ne s'opposant pas à une sulfatation nouvelle et immédiate.

Accidents. — Très nombreuses sont les causes d'acci-

dents qui peuvent arriver à une batterie d'accumulateurs. Nous les examinerons séparément en indiquant la façon de les discerner et de les supprimer.

Court circuit entre les plaques négatives et les plaques positives. — L'origine de ce court circuit peut être dû :

a) à une connexion métallique accidentelle ;

b) à la chute d'un débris de plaques ou de matière active qui s'est arrêté entre elles ;

c) à un gondolement des plaques.

On reconnaîtra l'existence de ce fait en constatant que la différence de potentiel aux bornes de la cuve est inférieure au produit par 2 du nombre des éléments. A l'aide du voltmètre gradué au dixième on arrivera rapidement à déterminer l'élément défectueux.

On vérifiera la position relative des plaques entre elles et avec la cuve, si celle-ci est métallique, ainsi que les connexions des plaques aux barres. On recherchera s'il ne s'est pas formé de dépôts salins sur les parois de la cuve, dépôts qui peuvent mettre les plaques en court circuit.

Si cet examen ne donne rien, on passera une baguette de bois entre les plaques pour faire tomber la matière étrangère cause du court circuit, et les sels grimpants qui se forment parfois.

Pertes au sol. — Ces pertes sont dues à un défaut d'isolement des bacs, ou à une dérivation due à la condensation d'eau acidulée sur les parois des bacs et les planches qui les supportent.

Défaut d'isolement. — On humecte le support des bacs avec de l'eau acidulée et l'on met à la terre l'une des extrémités d'un circuit comprenant un galvanomètre l'autre extrémité étant reliée au support. Toute fuite sera décelée par une déviation de l'aiguille.

Si la perte est forte, on ressentira une secousse en mettant un doigt sur la planche et en touchant une terre soit avec l'autre main soit avec les pieds.

Il faut essuyer les parois des bacs, nettoyer les isolateurs et renouveler au besoin leur garde d'huile.

Dérivations au sol. — L'eau acidulée condensée sur le support de la cuve jouant le même rôle que celle que l'on a versée pour constater le défaut d'isolement dans le premier cas, il en résulte des pertes au sol par les madriers et autres supports.

On reconnaîtra l'existence de ces pertes soit à l'aide d'un galvanomètre soit par contact avec la main, et l'on y remédiera en essuyant bacs, isolateurs et madriers.

Remplacement de pastilles tombées. — On peut assez facilement remplacer des pastilles désagrégées.

Pour les positives, on fait un mélange de minium ou d'oxyde puce avec deux parties d'eau et une partie d'acide sulfurique. La pâte devient rouge brun et on ajoute de l'acide sulfurique jusqu'à disparition de la couleur du minium, qui correspond à la transformation de l'oxyde de plomb en sulfate. On bourre de cette pâte les alvéoles vides, et on laisse sécher 36 heures.

Pour les plaques négatives, on emploierait de la litharge à la place de minium ou d'oxyde puce.

Accumulateurs à l'inactivité. — Quand une batterie doit rester inactive longtemps, soit plusieurs mois, il convient de la charger à refus, de vérifier l'absence de pertes au sol, et de la laisser dans cet état.

Les expériences de M. G. Roux ont prouvé qu'en 2/5 mois une batterie de 200 ampères-heure de capacité montée sur isolateurs à huile n'avait perdu que 63 ampères-heure, soit 6 % de sa capacité initiale.

Les plaques se conservent en parfait état.

Moins recommandable est le procédé qui consiste à enlever l'électrolyte, et à le remplacer par de l'eau ; il arrive alors très souvent que la surface des plaques s'altère.

Durée des accumulateurs. — Tout d'abord, les plaques positives s'usent deux fois plus vite que les négatives. La durée d'une batterie sera très courte, toutes autres conditions égales, si l'on dépasse les régimes de charge et de décharge normaux, et si l'on néglige les soins quotidiens dont elle doit être l'objet. Elle sera d'autant plus grande que les carcasses métalliques des plaques seront plus fortes, partant plus lourdes et par suite plus coûteuses. Les trépidations abrègent la durée des plaques en provoquant la chute des pastilles de matière active. Il est donc impossible de dire qu'une batterie fera un service de tant d'années, mais en prenant comme base les conditions moyennes d'épaisseur des plaques et de service, on peut compter sur une durée des plaques positives de un an à 18 mois et une durée à peu près double des plaques négatives.

Certains constructeurs assignent à leurs accumulateurs une durée beaucoup plus longue, et s'engagent à les entretenir à leurs frais pendant 10 ans moyennant une rétribution annuelle de 5 à 10 % du prix d'achat.

CHARGE ET DÉCHARGE

Mise en charge d'une batterie. — Les éléments sont tout d'abord groupés entre eux de façon à produire aux bornes, une fois chargés, une différence de potentiel

de 10 à 20 % inférieure à celle que donnera la machine. Leur résistance totale doit être le triple de celle de la dynamo.

Celle-ci est mise en marche jusqu'à ce qu'elle ait atteint sa vitesse de régime, et quand un voltmètre ou une lampe témoin indiquent que sa force électromotrice a pris sa valeur normale, on ferme le circuit des accumulateurs. La charge commence.

Conduite de la charge. — Dès le début la force électromotrice de la batterie étant nulle, il se pourrait que l'intensité du courant fourni par la dynamo fut supérieure à celle du régime de charge et ne détériorât les plaques : aussi intercale-t-on dans le circuit de charge, ou dans celui de l'excitation, une résistance variable, dite rhéostat, qui permet de graduer le courant. On pourrait obtenir le même résultat en modifiant le groupement des accumulateurs.

On voit l'intensité du courant de charge diminuer peu à peu pendant une vingtaine de minutes et prendre une valeur constante : à partir de ce moment on peut donner au courant de charge toute son intensité.

Pendant la charge, la densité du liquide des accumulateurs augmente et passe théoriquement de 1,150 à 1,220, tandis que le poids des plaques diminue : en effet, 1,464 grammes de sulfate de plomb correspondent respectivement à 1,155 d'oxyde puce et à 1 gr. de plomb, et ces trois corps ont pour densité le sulfate 6,24, l'oxyde 9,42 et le plomb 11,36.

Une autre considération à déduire de ces chiffres est que 2,7 centimètres cubes de sulfate de plomb correspondent à 1,4 centimètre cube de bioxyde et à 1 centimètre cube de plomb. Par suite, pendant la décharge

une alvéole renfermant 1 centimètre cube de plomb ou 1,4 centimètre de bioxyde, verra augmenter considérablement le volume de la matière active qu'elle contient ; l'inverse se produira pendant la charge. Ces contractions et dilatations successives de la matière active provoquent des gondolements des plaques dont nous verrons ultérieurement l'effet nuisible.

Aussi longtemps que l'action électrolytique du courant pénètre aisément à l'intérieur des pastilles de matière active, la charge se continue et aucun phénomène nouveau n'apparaît. Lorsque la matière active sera décomposée sur une profondeur telle que les couches sous-jacentes ne seront plus que peu altérées, l'action électrolytique se portera sur l'eau acidulée qui se décomposera et des bulles de gaz se dégageront de plus en plus abondantes au fur et à mesure que la charge sera plus avancée. Le dégagement gazeux indique la fin de l'opération. Il ne faut pas cependant couper le courant dès l'apparition des bulles, la batterie serait incomplètement chargée. On doit attendre environ 1/2 heure pendant laquelle, à l'aide du rhéostat, on réduit peu à peu l'intensité du courant.

La charge est alors complète. On dérive le courant principal, sur une résistance, on met tout le rhéostat d'excitation en série sur les inducteurs, et l'on arrête la dynamo.

Un autre indice d'une charge complète est la variation de la densité du liquide ; mais il faut tenir compte cependant de ce que la composition du liquide n'est pas très constante.

Néanmoins on peut utiliser cette propriété de l'électrolyte à l'aide de densimètres, qui sont pour la plupart

des aréomètres à poids constant, et de l'intéressant indicateur de charge de M. G. Roux. Cet appareil non seulement indique par la lecture où en est la charge, mais encore avertit par une sonnerie de la fin de l'opération.

On peut modifier le courant de charge suivant les besoins, en utilisant un *réducteur*, le rhéostat *e* d'excitation de la machine et le rhéostat *c* intercalé dans le circuit principal : les combinaisons sont les suivantes : *L'intensité restant constante augmenter la force électromotrice :* accroître la résistance du circuit extérieur, par le rhéostat *c* ou le réducteur, et la force électromotrice de la machine par le rhéostat *e* ou une augmentation de vitesse.

Réduire l'intensité, la force électromotrice restant constante, faire la manœuvre inverse de la précédente.

Augmenter l'intensité. Réduire la résistance du circuit extérieur par le rhéostat *c* ou le réducteur.

La durée de la charge peut être évaluée en divisant la capacité totale exprimée en ampères-heure par l'intensité du courant de charge, et en multipliant le quotient par l'inverse du coefficient de rendement en quantité, 80 % en moyenne.

Exemple numérique. — Calculer la durée de charge d'une batterie de capacité totale de 2000 ampères-heure, le courant de charge ayant une intensité de 50 ampères. Réponse

$$T \text{ heures} = \frac{2\,000 \times 100}{50 \times 80} = 50 \text{ heures.}$$

Décharge. — Les accumulateurs après avoir été convenablement groupés selon les nécessités du service, sont branchés sur le circuit d'utilisation. Si la résistance

de ce dernier est très grande l'intensité du courant baissera rapidement ; si elle est trop faible, au contraire les accumulateurs se déchargeront très rapidement et il en résultera d'abord un abaissement du rendement puis un gondolement des plaques qui peut provoquer la désagrégation et la chute de la matière active.

Quand le régime de décharge est normal, la différence de potentiel aux bornes de la batterie passe rapidement de 2,5 volts à 2 volts, taux auquel elle reste pendant presque toute la durée de la décharge ; vers la fin elle tombe à 1,9 volts. On ajoute alors quelques éléments de secours tenus jusque-là en réserve, qui remontent pendant un temps assez court la force électromotrice de la batterie, et quand on ne trouve plus à nouveau que 1,9 volt par élément on met la batterie hors circuit. Pratiquement elle est vidée, car pour sa conservation il est bon de ne pas pousser la décharge au delà de 75 °/₀ ; il en résulterait une transformation trop profonde de la matière active en sulfate de plomb.

Après un certain temps de repos, l'accumulateur pourra être rechargé.

Après repos, il peut aussi fournir une seconde décharge utilisable, mais on a rarement à recourir à ce subterfuge.

Pour évaluer la durée de la décharge, on divise par l'intensité du courant de décharge, le produit de la capacité totale de la batterie par le coefficient de décharge, ce dernier représentant le point auquel on pousse cette dernière.

Exemple numérique. — Calculer la durée de décharge d'une batterie de 1 500 ampères-heure de capacité, le

coefficient de décharge et l'intensité du courant étant respectivement 75 % et 200 ampères :

Réponse :

$$T \text{ heures} = \frac{1\,500 \times 75}{200 \times 100} = 5^h,37'$$

La durée de décharge dépasse rarement 6 à 8 heures.

PROBLÈMES RELATIFS A L'EMPLOI DES ACCUMULATEURS

Problèmes relatifs à l'emploi des accumulateurs. — L'emploi des accumulateurs donne lieu à la résolution d'un certain nombre de problèmes dont nous donnons ci-dessous les types principaux.

1er *Problème.* — Déterminer les éléments d'une batterie destinée à alimenter pendant 5 heures. — 100 lampes à incandescence de 100 volts et 0,5 ampère, montées en dérivation, le circuit extérieur ayant une résistance de 0,2 d'ohm.

L'intensité du courant devra être de :

$$100 \times 0{,}5 = 50 \text{ ampères}$$

et la différence de potentiel aux bornes de la batterie de 100 volts ; pour contrebalancer la chute de potentiel aux bornes des lampes, il convient d'ajouter pour perte de charge dans le circuit :

$$R \times I = 0{,}2 \times 50 = 10 \text{ volts.}$$

La batterie devra donc donner 110 volts à ses bornes, et elle se composera de :

$$\frac{110}{2} = 55 \text{ éléments en tension}$$

soit 60 éléments en tenant compte des éléments en réserve que l'on devra ajouter vers la fin de la décharge.

La durée d'éclairage étant de 5 heures, la capacité de la batterie sera de :

$$5 \times 50 = 250 \text{ ampères-heure.}$$

On choisira donc le type d'accumulateur ayant cette capacité, et à son défaut, le type de capacité immédiatement supérieur.

2e *Problème.* — Calculer le travail développé par la dynamo et le moteur mécanique pour charger la batterie désignée dans le problème précédent, et déterminer les constantes de la dynamo de charge.

Le travail développé par la batterie est :

$$\frac{110^{v} \times 50^{a} \times 5^{h} \times 3.600''}{9,81} = 10.091.743 \text{ kilogrammètres pour 5 heures.}$$

soit :

$$\frac{10.091,743}{270.000} = 37,37 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Le rendement de la batterie en énergie étant de 60 °/₀, les 37,37 chevaux-vapeur correspondent, en tenant compte de la perte de 5 °/₀ dans les connexions, à un travail de :

$$\frac{37,37 \times 100 \times 100}{60 \times 95} = 65,55 \text{ chevaux-vapeur pour la dynamo.}$$

Le travail développé par le moteur mécanique, le rendement de la dynamo étant 95 °/₀, sera de :

$$\frac{65,55 \times 100}{95} = 69 \text{ chevaux.}$$

En résumé, la batterie, la dynamo et le moteur auront respectivement développé un travail de : 37,37 — 65,55 et 69 chevaux.

Quelles seront les constantes de la dynamo à employer ? Quelle sera la durée de la charge ?

Les régimes de charge et de décharge étant respectivement dans les types courants de 1,5 et de 2 ampères par kg de plaques, l'intensité du courant de charge sera de 35 ampères, les accumulateurs étant chargés en tension, bien entendu.

La différence de potentiel aux bornes de la dynamo devra être de 165 volts se décomposant ainsi :

Aux bornes de la batterie. $60 \times 2,75 =$	165 volts
Pour perte de charge dans le circuit. .	5 —
Total	170 volts

La durée de la charge se déduit de la capacité et du rendement en quantité. Prenons ce dernier égal à 80 %, et rappelons que la capacité de la batterie doit être de 250 ampères-heure.

La quantité d'électricité à fournir sera de :

$$\frac{250 \times 100}{80} = 312,5 \text{ ampères-heure.}$$

Le courant de charge sera de 31,25 ampères, la charge devant durer deux fois plus de temps que la décharge.

3e *Problème*. — Déterminer les constantes d'une dynamo susceptible d'alimenter simultanément 100 lampes à incandescence, en dérivation, de 100 volts — 0,5 ampère et une batterie d'accumulateurs qui devra ensuite assurer le service de 100 lampes en dérivation

de 100 volts et 0,5 ampères pendant 4 heures. La résistance du circuit est de 0,4 ohm.

Les lampes étant en dérivation, la dynamo devra fournir pour le service des lampes alimentées *directement* :

$$100 \times 0,5 = 50 \text{ ampères}$$

et une différence de potentiel aux bornes de 120 volts.

$$100 + 0,4 \times 50 = 120 \text{ volts.}$$

La batterie d'accumulateurs devra évidemment être chargée sous 120 volts, et donner la même différence de potentiel aux bornes soit :

$$100 + 0,4 \times 50 = 120 \text{ volts.}$$

La batterie comprendra donc

$$\frac{120}{2} = 60 \text{ éléments}$$

soit 65 avec la réserve.

Le service des 100 lampes alimentées par la batterie pendant 4 heures, nécessite pour celle-ci une capacité minima de :

$$100 \times 0,5 \times 4 = 200 \text{ ampères-heure}$$

et le courant de charge sera de :

$$\frac{100 \times 0,5}{2} = 25 \text{ ampères.}$$

Le rendement en quantité étant pris de 80 pour cent, il faudra fournir à la batterie.

$$\frac{200 \times 100}{80} = 250 \text{ ampères-heure.}$$

Le courant de charge étant de ampères la durée de la charge sera de $\frac{250}{25} = 10$ heures.

En résumé, la dynamo devra donner à ses bornes 120 volts et débiter un courant de :

50 ampères pour le service des lampes alimentées directement,

et de 25 ampères pour le service de la batterie, soit au total de 75 ampères.

Si l'éclairage direct doit durer plus de 10 heures, la charge de la batterie commençant avec lui, on devra retirer cette dernière du circuit au bout de 10 heures.

En forçant le régime de charge on pourrait, sans danger, réduire à 7 heures la durée de la charge avec un courant de 36 ampères.

Travail mécanique développé dans la charge d'une batterie. — Supposons qu'il s'agisse d'emmagasiner un travail de 100 chevaux-vapeur, et prenons les nombres 60 et 95 comme rendement en énergie de la batterie et rendement industriel de la dynamo.

La batterie devant restituer 100 chevaux, la dynamo devra lui en fournir :

$$\frac{100 \times 100}{60} = 166{,}66$$

et le moteur mécanique aura dû développer un travail

$$\frac{166{,}66 \times 100}{95} = 175{,}43 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Détermination du type d'accumulateur à employer. — Quand on connaît la capacité et la différence de po-

tentiel à recueillir aux bornes de la batterie on peut déterminer le type d'accumulateur à employer.

Prenons le cas d'une batterie de 250 ampères-heure de capacité et de 100 volts à ses bornes.

Chaque élément donnant 2 volts, il en faudra 50 en série chacun de 250 ampères-heure de capacité.

Chaque kg de plaque ayant 15 ampères-heure de capacité on se trouvera amené à utiliser des éléments de 33,32 kg, soit 16,66 kg par plaque positive ou négative.

Quand la capacité par élément correspond à des dimensions de plaques gênantes, on prend des accumulateurs de capacité moitié moindre, mais en nombre double, et l'on en forme deux batteries que l'on couple en quantité.

Il faut tenir compte pour l'étude de l'emplacement de la batterie des dimensions extérieures et du poids total de l'élément, aussi croyons-nous intéressant de donner ces éléments pour les différents types d'accumulateurs construits par la société Tudor.

B. ÉLÉMENTS AVEC RÉCIPIENTS

Types		Capacité utilisable pour une décharge de cinq heures	Courant Maximum	
			à la charge	à la décharge
1 Numéros	2 Désignation	3 Ampères-heures	4 Ampères	5 Ampères
7	$2U^4$	160	24	32
8	$3U^4$	240	36	48
9	$4U^4$	320	48	64
10	$5U^4$	400	60	80
11	$3U^8$	480	72	96
12	$4U^8$	640	96	128
13	$5U^8$	800	120	160
14	$6U^8$	960	144	192
15	$7U^8$	1 120	168	224
16	$4U^{16}$	1 280	192	256
17	$5U^{16}$	1 600	240	320
18	$6U^{16}$	1 920	288	384
19	$7U^{16}$	2 240	336	448
20	$8U^{16}$	2 560	384	512
21	$9U^{16}$	2 880	432	576

DOUBLÉS DE PLOMB .

Dimensions extérieures des éléments			Par élément		
Longueur	Largeur	Hauteur	Poids des électrodes	Poids total sans acide	Eau acidulée
6 Millimètres	7 Millimètres	8 Millimètres	9 Kilogrammes	10 Kilogrammes	11 Litres
206	424	1 200	2 046	2 540	790
261	»	»	2 255	2 829	880
316	»	»	2 304	3 119	970
371	»	»	2 880	3 853	1 225
275	765	»	3 548	4 638	1 480
330	»	»	4 170	6 078	1 940
385	»	»	»	»	»
440	»	»	»	»	»
495	»	»	»	»	»
340	790	»	»	»	»
395	»	»	»	»	»
450	»	»	»	»	»
505	790	1 100	464	649	179
560	»	»	526	728	201
615	»	»	588	806	224

B. ÉLÉMENTS AVEC RÉCIPIENTS

Types		Capacité utilisable pour une décharge de cinq heures	Courant Maximum	
			à la charge	à la décharge
1 Numéros	2 Désignation	3 Ampères-heures	4 Ampères	5 Ampères
22	$10U^{16}$	3 200	480	640
23	$12U^{16}$	3 840	576	768
24	$14U^{16}$	4 480	672	896
25	$16U^{16}$	5 120	768	1 024
26	$18U^{16}$	5 760	864	1 152
27	$20U^{16}$	6 400	960	1 280
28	$22U^{16}$	7 040	1 056	1 408
29	$24U^{16}$	7 860	1 152	1 536
30	$14U^{32}$	8 960	1 344	1 792
31	$16U^{32}$	10 240	1 536	2 048
32	$18U^{32}$	11 520	1 728	2 304
33	$20U^{32}$	12 800	1 920	2 560
34	$25U^{32}$	16 000	2 400	3 200
35	$30U^{32}$	19 200	2 880	3 840
36	$40U^{32}$	25 600	3 840	5 120

DOUBLÉS DE PLOMB (*suite*).

Dimensions extérieures des éléments			Par élément		
Longueur	Largeur	Hauteur	Poids des électrodes	Poids total sans acide	Eau acidulée
6 Millimètres	7 Millimètres	8 Millimètres	9 Kilogrammes	10 Kilogrammes	11 Litres
670	»	»	650	885	255
780	»	»	774	1 042	300
890	»	»	898	1 198	350
1 000	»	»	1 022	1 354	390
1 110	»	»	1 146	1 510	440
1 220	»	»	1 270	1 668	490
1 330	»	»	1 394	1 825	540
1 440	»	»	1 518	1 981	590
890	1 520	1 200	1 798	2 342	690
1 000	»	630	35	69	20
1 110	»	»	50	91	26
1 220	»	»	64	112	32
1 500	»	»	77	132	38
1 800	»	670	104	172	48
2 350	»	»	135	212	60

CHAPITRE XI

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

Modes de distribution.

Après avoir étudié au point de vue spécial de leur utilisation et de leur entretien les appareils producteurs d'énergie électrique, il semblerait que la description du tableau de distribution dut en faire la suite.

Le *tableau* se trouve en effet directement intercalé entre le générateur et la canalisation, mais il est formé par la réunion d'un certain nombre d'appareils de mesure, de contrôle dont la description et le mode d'emploi ne seront décrits qu'au tome II de cet ouvrage; d'autre part, l'étude des modes de distribution ne nécessite pas la connaissance préalable des éléments d'un tableau de distribution, et nous supposerons que les câbles partent de ses bornes. Deux systèmes principaux sont employés : la distribution en série et celui en dérivation applicables que le courant soit continu ou alternatif. Mais pour plus de clarté nous traiterons séparément le courant continu et le courant alternatif d'autant plus que ce dernier n'est guère utilisé qu'avec l'adjonction de transformateurs.

I. — DISTRIBUTION DIRECTE PAR COURANT CONTINU

Suivant que la dynamo génératrice produit ou non un courant directement utilisable par les lampes on aura deux modes distincts de distribution, l'une directe et l'autre indirecte.

Dans le premier cas, la dynamo marche directement sur les lampes, et dans le second elle actionne soit des accumulateurs, soit des transformateurs de courant continu.

Nous traiterons d'abord de la distribution directe.

Distribution en série. — C'est le mode le plus simple à concevoir ; les lampes sont embrochées sur un conducteur qui part d'un pôle du tableau pour revenir à l'autre, la borne + de l'une communiquant à la borne — de l'autre.

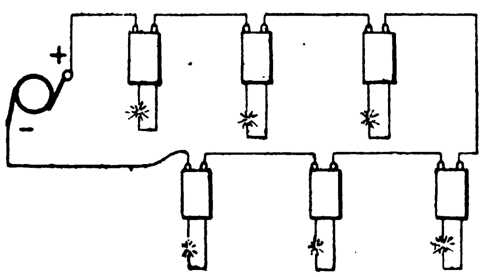


Fig. 118. — Distribution en série.

D'après les principes de la loi de Ohm la différence de potentiel aux bornes de la dynamo doit être égale à la somme des chutes de potentiel le long de la ligne.

Dans le cas de la figure ci-dessus, avec des lampes à arc semblables entre elles, exigeant une différence de potentiel à leurs bornes égales à *e*, et un conducteur de résistance total R, on aurait :

$$E = ne + RI$$

E. et I représentant respectivement la différence de potentiel aux bornes de la dynamo et l'intensité du courant.

Exemple numérique. — Calculer la différence de potentiel nécessaire aux bornes de la dynamo pour alimenter six lampes à arc de 4 ampères et 55 volts montées en série sur un conducteur de résistance totale égale à 2 ohms ?

On aurait :

$$E = 6 \times 55 + 2 \times 4$$
$$E = 330 + 8 = 338 \text{ volts.}$$

Dans une distribution en série, l'intensité du courant est constante, quel que soit le nombre de récepteurs en service ; par contre la différence de potentiel aux bornes de la dynamo, et par suite la force électromotrice, doit varier en même temps que l'on ajoute ou retire des récepteurs du circuit, de telle sorte que l'on ait toujours :

$$E = ne + RI.$$

Les distributions en série seront donc alimentées, dans le cas des courants continus, par des dynamos série et dans le cas des courants alternatifs, par des alternateurs à intensité constante, par ceux dont l'induit jouit d'un coefficient de self induction élevé.

La haute tension sous laquelle sont produits les courants alternatifs rend leur emploi dangereux dans une distribution ordinaire, et l'on a généralement recours à une *distribution en série par transformateurs.*

Les lampes peuvent alors être impunément maniées, mais les frais de premier établissement de la ligne sont plus que doublés.

Avantages et inconvénients de la distribution en série. — Ce mode est le plus économique au point de vue des frais de premier établissement. La ligne, en effet, est faite d'un conducteur de faible diamètre puisque l'intensité du courant n'est jamais que celle qui correspond à une seule lampe.

Par contre, le courant a une tension quelquefois de plusieurs milliers de volts, et les dérivations au sol, sans parler des accidents de personnes, sont à craindre.

D'autre part, la mise hors circuit d'une lampe par extinction volontaire, accident ou autre cause, coupe le circuit et provoque l'extinction de toutes les autres.

Pour éviter un accident de cette nature, on doit munir les lampes d'un *veilleur en tension*, sorte de commutateur, ouvert quand la lampe brûle, et qui se ferme automatiquement lorsque la lampe s'éteint en marche. Le veilleur est en dérivation sur les bornes de la lampé.

Pour être montées en série, les lampes doivent pouvoir fonctionner toutes avec la même intensité de courant.

Ce mode de distribution s'applique à l'éclairage des grands espaces, voies publiques, places, etc., par lampes à arc *différentielles* ou en *dérivation.* On l'utilise aussi à

l'éclairage des halls, en montant les lampes à arc en série par deux ou plus.

Distribution en dérivation. — Les lampes sont alimentées chacune par des conducteurs spéciaux branchés soit sur les câbles principaux, soit sur des conducteurs reliés eux-mêmes à la ligne (fig. 119 et 120).

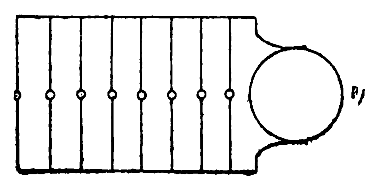


Fig. 119. — Distribution par câbles cylindriques parallèles.

La dynamo doit fournir un courant dont l'intensité est égale à la somme des intensités consommées à chaque instant ; sa force électromotrice reste constante.

Les lampes devront être construites ou réglées pour

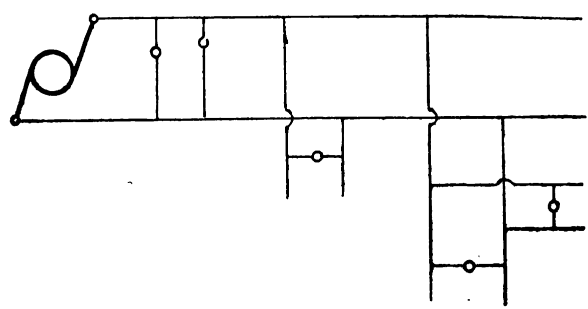


Fig. 120. — Cas général de la distribution en dérivation.

fonctionner sous une différence de potentiel à leurs bornes qui sera constante et déterminée ; mais elles pourront différer entre elles par la valeur de l'intensité de leur courant normal d'alimentation.

On aura :

$$I = \Sigma i$$

i représentant l'intensité du courant exigé par une lampe allumée.

A l'examen de la figure 122 on se rend compte que la différence de potentiel aux bornes des deux lampes extrêmes n'est pas identique, ces deux lampes étant à des distances différentes de la dynamo ; il se produit en effet une perte de charge, dont la valeur est donnée pour chaque lampe par un produit de la forme RI de l'intensité qui circule dans les câbles principaux de la dérivation par la résistance respective de ces deux circuits.

Pratiquement la différence de potentiel aux bornes des lampes varie donc de l'une à l'autre, et décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la dynamo : en outre, la différence de potentiel aux bornes de chaque lampe varie d'un instant à l'autre avec la consommation, comme le montre le calcul suivant.

Désignons par :

$1.\ 2\ .\ .\ .\ .\ .\ (n-1)\quad n\quad (n+1)\ .\ .\ .\ .\ .\quad p$

le rang, à partir de la dynamo des p dérivations sur les câbles principaux

R la résistance d'un des conducteurs principaux entre les dérivations $(n-1)$ et n

R' la résistance du second conducteur principal entre les deux mêmes dérivations.

I l'intensité du courant qui circule sur chacun des conducteurs principaux entre les dérivations $(n-1)$ et n. Cette intensité est égale à la somme des intensités nécessaires à l'alimentation des $p-n$ branchements *au-delà* de la dérivation n.

$V.\ V_1 - V'.\ V'_1$ les potentiels en n sur les deux conducteurs principaux,

D'après la loi de Ohm on aura :

$$V - V_1 = Ri \qquad V_1' - V_1 = R'i$$

d'où :

$$(V - V_1) - (V_1 - V'_1) = (R + R')\, i$$

Le montage en dérivation autorise l'extinction ou l'allumage de lampes quelconques sans amener l'extinction des autres, et comme conséquence du calcul ci-dessus, pour que l'éclat des lampes en service ne soit pas altéré par l'allumage ou l'extinction d'autres lampes, l'expérience l'a prouvé, il ne faut pas qu'il résulte de ces manœuvres une variation de la différence de potentiel aux bornes des lampes en service supérieure à 1,5 à 2 °/₀.

Calcul de la perte de charge sur les conducteurs principaux. — Il est utile de calculer, dans l'établissement d'un projet la perte de charge le long des conducteurs principaux. On emploiera la formule ci-dessous (fig. 121) où l'on représentera par :

$R\, R_1 \ldots\ldots R_p$ la résistance totale des deux parties des conducteurs principaux comprises respectivement entre les bornes de la dynamo et chacune des dérivations que nous désignerons comme plus haut par leur numéro d'ordre à 1.2.......p à partir de l'origine;

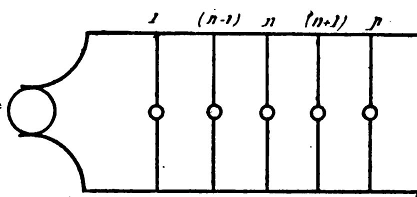


Fig. 121. — Distribution par câbles cylindriques parallèles.

$i.\ i_1 \ldots\ldots\ ip$ l'intensité du courant qui circule dans chacune des p dérivations.

La perte de charge est égale à :

$$e = Ri + R_1 i_1 + \ldots\ldots + R_p i_p$$

Le potentiel sur chaque conducteur s'abaisse d'autant plus que l'on s'éloigne de la source et en même temps que lui la différence de potentiel entre deux points situés chacun sur un conducteur, à égale distance de la source.

Il en résulte que sur une canalisation un peu étendue on ne pourra employer des lampes identiques, car si les premières sont dans les conditions voulues pour leur marche normale, les plus éloignées de la source ne le seront pas et réciproquement.

La chute de potentiel aux bornes des lampes augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la dynamo, et l'on a cherché à la réduire en donnant à la canalisation principale une disposition particulière.

Différentes solutions ont été proposées que nous allons examiner.

Distribution antiparallèle ou en Boucle. — Ce mode de distribution a pour objet de donner aux lampes une égale *distance électrique* à partir de la dynamo.

L'examen des figures ci-dessous montre cette disposition ; les lampes sont montées entre le retour de la boucle et l'autre fil, et l'on se rend compte aisément que le trajet suivi par le courant est le même pour chacune des lampes.

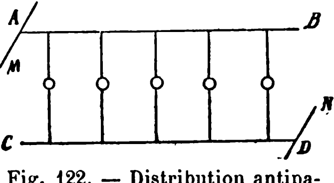


Fig. 122. — Distribution antiparallèle.

La constance de la valeur du potentiel sur tout le circuit n'est cependant pas absolue.

Ce mode de distribution

entraîne une dépense de fil élevée par le bouclage d'un des conducteurs principaux.

La perte de charge est moitié de ce qu'elle aurait été

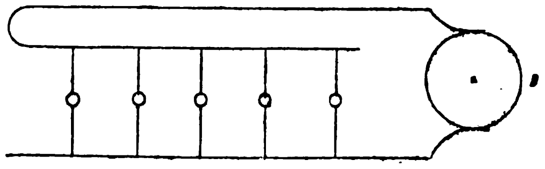


Fig. 123. — Distribution en boucle.

toutes conditions égales dans une distribution par câbles parallèles.

On peut sans grande erreur calculer la section des câbles principaux comme si toutes les lampes étaient placées à l'extrémité du circuit opposée à la dynamo.

Distribution en Ceinture. — Cette disposition des conducteurs principaux a l'avantage de mettre toutes les lampes à la même distance des bornes du circuit principal, et de réduire la variation de la différence de potentiel le long du circuit.

Le courant ne suit qu'une moitié du circuit principal, et l'on calculera la section de ce dernier en suppo-

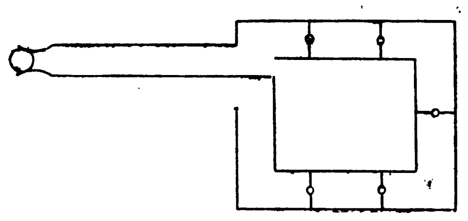


Fig. 124. — Distribution en ceinture.

sant que toutes les lampes sont placées à une distance de la dynamo égale à la moitié du circuit total.

La variation de la différence de potentiel entre les lampes les plus éloignées l'une de l'autre, est moitié de ce qu'elle aurait été, toutes autres conditions égales, si la canalisation avait été faite de deux conducteurs cylindriques.

Combinaison des montages en boucle et en ceinture. — Cette disposition jouit des avantages de l'un et de l'autre des systèmes de montage combinés, et de leur défaut commun de nécessiter l'emploi d'une grande longueur de fil et des frais de montage proportionnels.

La section des conducteurs principaux s'évaluera en prenant comme longueur de leur circuit, la longueur des conducteurs bouclés augmentée de la demi-longueur de la ceinture.

Distribution par câbles coniques parallèles. — Dans une distribution étendue on peut avec avantage employer des câbles coniques dont la section décroît en raison de la diminution de l'intensité du courant à conduire. On réalise ainsi une économie de cuivre. La variation de la différence de potentiel le long du circuit est double de ce qu'elle aurait été avec des câbles cylindriques parallèles.

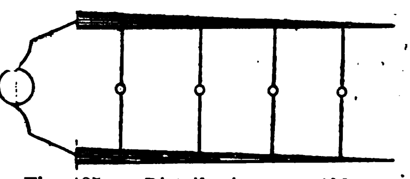


Fig. 125. — Distribution par câbles coniques parallèles.

Distribution par câbles coniques antiparallèles. — Les câbles coniques sont reliés à la dynamo l'un par sa base et l'autre par son

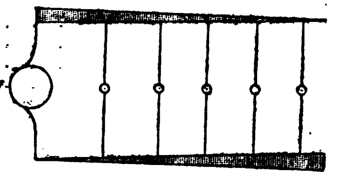


Fig. 126. — Distribution par câbles coniques antiparallèles.

sommet. La variation de la différence de potentiel est nulle sur toute la longueur.

Distribution en boucle par câbles équilibrés. — On réalise cette disposition en reliant l'une des bornes du tableau à la base d'un câble conique et l'autre borne à un câble cylindrique dont la boucle sera formée d'un câble conique identique au premier.

La section du câble cylindrique doit être égale à celle de la base du câble conique. La somme des sections des deux câbles coniques par un plan perpendiculaire à leur direction est constante.

L'emploi de deux conducteurs principaux coniques donne lieu à une variation uniforme de la différence de potentiel sur la ligne, double de ce qu'elle eut été avec des conducteurs cylindriques : par contre, le poids de cuivre est réduit comparativement de deux tiers.

Le tableau suivant résume les conditions de fonctionnement des quatre modes principaux de distribution en dérivation :

Distribution par câbles	Ecart maximum de la différence de potentiel	Poids de cuivre	Énergie dissipée dans la canalisation
Coniques anti-parallèles	0	1	3
Cylindriques (boucle)	1	3	3
Cylindriques parallèles	2	3	2
Coniques parallèles	4	1	2

Distributions mixtes. — Il arrive assez fréquemment que l'on ne peut monter toutes ces lampes individuellement en dérivation, et que l'on est amené à les répartir

par groupes dans chacun desquels ces récepteurs sont montés en série.

La fig. 127 montre cette disposition.

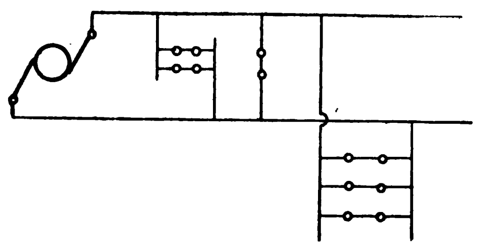


Fig. 127. — Distribution mixte.

Les lampes à arc L doivent être montées sur des circuits distincts de ceux des lampes à incandescence I; leur marche est toujours accompagnée de soubresauts plus ou moins fréquents qui altéreraient le filament des lampes à incandescence et feraient osciller leur éclat (fig. 129).

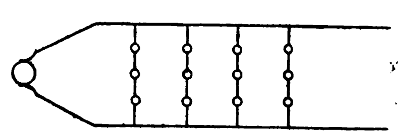


Fig. 128. — Distribution mixte.

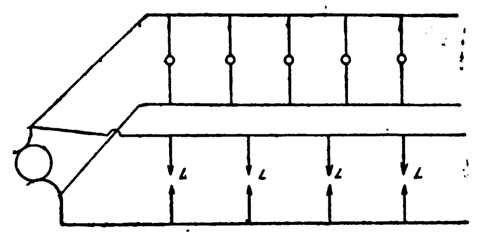


Fig. 129. — Distribution en dérivation par lampes à arc et lampes à incandescence.

Les lampes étant supposées identiques entre elles, si

les groupes contiennent chacun *n* lampes exigeant chacune à leurs bornes une différence de potentiel de *e* volts, la dynamo devra produire un courant égal à celui de *p* lampes, s'il y a *p* groupes et donnant aux bornes de chaque groupe une tension de *n e* volts.

Au point de vue des dépenses en cuivre cette disposition est plus avantageuse que la distribution en dérivation individuelle, mais elle a le défaut de rendre solidaires toutes les lampes d'une série pour le cas où un accident arriverait à l'une d'elles.

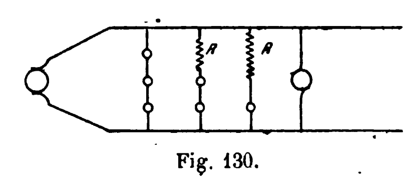


Fig. 130.

Les groupes en série peuvent comprendre des nombres différents de lampes, mais alors il faut intercaler sur ceux qui en contiennent le moins, des rhéostats R fig. 132 dont la résistance équivaut à celle des lampes en moins. Sans cette précaution il passerait dans les récepteurs un courant trop intense qui pourrait les détruire.

Quelquefois on monte les lampes à incandescence en dérivation sur le circuit des arcs, comme l'indique la fig. 131, ou l'on monte arcs et lampes à incandescence en dérivation sur deux conducteurs principaux. Dans ce cas il faut établir à l'aide de résistances additionnelles R une chute de potentiel convenable entre les extrémités de chaque dérivation.

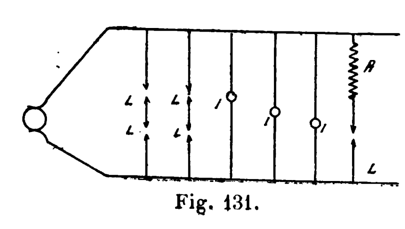


Fig. 131.

Le montage en dérivation des lampes à incandescence

et des arcs sur un même circuit principal, n'est pas à recommander, car quelques précautions que l'on prenne le *réglage* des arcs fait *varier* l'éclat des lampes à incandescence.

On devra donc, chaque fois qu'on le pourra, établir deux circuits distincts l'un pour les arcs et l'autre pour les lampes à incandescence : au besoin on mettra en série sur le circuit des arcs un rhéostat pour amener aux bornes de ceux-ci un courant sous la tension voulue.

Distribution à trois fils. — Il y a lieu, au point de vue de la description du mode de montage, de distinguer deux cas :

La distribution est faite sans feeders,

— — — avec feeders.

1er *Cas.* — Deux dynamos sont couplées en série, et leur force électromotrice est telle que la différence de

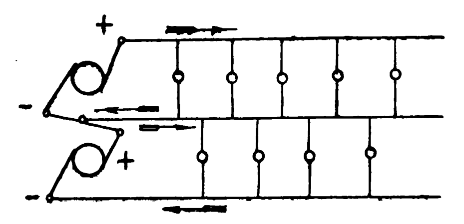


Fig. 132. — Distribution à trois fils.

potentiel entre les deux balais libres est double de celle qu'exige le service des lampes.

De chacun des balais libres part un des conducteurs principaux et de leur pôle commun le troisième conducteur dit *fil d'équilibre ou de compensation.*

Les lampes sont réparties sur chacune des deux parts de telle sorte qu'il y ait autant que possible égalité de

consommation à droite et à gauche du fil d'équilibre. Quand cette condition est réalisée, le fil d'équilibre n'est parcouru par aucun courant.

Si les consommations sont différentes de part et d'autre du fil d'équilibre, ce dernier est le siège d'un courant dont l'intensité est égale à la différence des courants utilisés sur chaque pont ; et, dans le cas le plus défavorable, celui où toutes les lampes d'un pont brûlent tandis que celles de l'autre pont sont toutes éteintes, le fil d'équilibre n'est traversé que par la moitié du courant total que l'usine doit fournir.

Si cette dernière éventualité est à prévoir, le fil d'équilibre devra présenter une section moitié moindre que de celle de l'un des câbles principaux, mais c'est l'exception, et généralement les lampes sont groupées de telle sorte qu'il puisse n'avoir qu'une section du quart.

Dans le premier cas, le poids de cuivre à employer sera les trois quarts de celui qu'exigerait le système équivalent à deux fils, et dans le deuxième il n'en sera plus que les cinq huitièmes.

La perte de charge le long d'un des conducteurs principaux se calcule comme s'il s'agissait d'une distribution à deux fils : si toutes les lampes sont allumées, sur chaque pont, elle sera la moitié de ce qu'elle eût été dans une distribution à deux fils, avec la même densité de courant : elle deviendra la même quand toutes les lampes d'un pont sont allumées et que celles de l'autre pont seront éteintes.

Les lampes sont, d'une façon générale, réparties sur chacun des ponts, mais elles peuvent aussi être branchées, s'il y a lieu, entre les deux conducteurs principaux.

Distribution à trois fils en boucle. — Pour réduire la perte de charge le long des conducteurs principaux, on peut employer le montage en boucle ; les lampes sont alors branchées sur chaque pont entre le câble principal et le retour de boucle du fil d'équilibre.

Distribution à trois fils par câbles équilibrés. — On peut aussi pour réaliser le même but employer des câbles coniques, orientés dans un sens pour les conducteurs principaux, et en sens opposé pour le fil d'équilibre (voir Tome III, *Secteur Edison*).

Distribution à cinq fils. — De même dans le cas du trois fils on peut se servir ou non de feeders.

Considérons le premier cas, celui d'une distribution sans feeders.

Quatre dynamos semblables entre elles, donnant chacune à ses bornes la différence de potentiel la plus basse

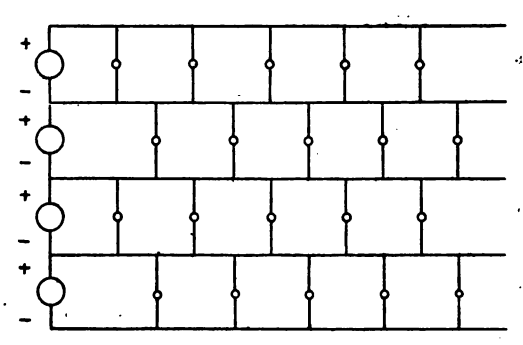


Fig. 133. — Distribution à cinq fils.

à utiliser sur le réseau sont couplées en série ; de chacun des cinq pôles part un câble.

On a donc un réseau de cinq conducteurs.

Entre deux conducteurs voisins la différence de poten-

tiel sera celle donnée par une dynamo, soit E volts ; entre les conducteurs 1 et 3 elle sera de 2 E volts : entre les conducteurs 1 et 4 de 3 E volts, et de 4 E volts entre les conducteurs extrêmes.

Pour réduire à son minimum la perte de charge, on répartit les lampes sur chaque pont de façon que la consommation en ampères soit autant que possible la même sur chacun d'eux.

Le système à cinq fils permet de réduire les dépenses de cuivre dans une plus grande mesure que celui à trois fils.

En effet deux distributions équivalentes faites l'une à trois et l'autre à cinq fils nécessiteront un poids de cuivre qui sera pour la première les $\frac{3}{4}$ et pour la seconde les $\frac{5}{18}$ du poids de cuivre qu'aurait utilisé la même distribution faite à deux fils.

Distribution par feeders. — Cette solution permet de donner aux bornes des lampes une différence de poten-

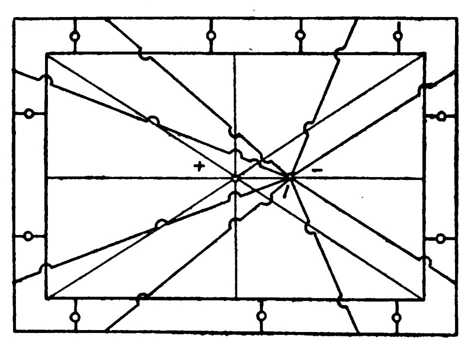


Fig. 134. — Distribution fermée à deux fils par feeders.

tiel à peu près constante sur tout le réseau et constitue

un mode de distribution plus économique que celui en boucle ou en ceinture.

Elle s'applique très avantageusement à la distribution de l'énergie électrique dans les villes.

Son principe est le suivant : Les lampes des abonnés sont réparties sur un ou plusieurs circuits distincts, ouverts mais plutôt fermés sur eux-mêmes (fig. 134 et 135) ; chacun de ces circuits est alimenté sur un ou plusieurs points par des câbles dits *feeders*, sur lesquels

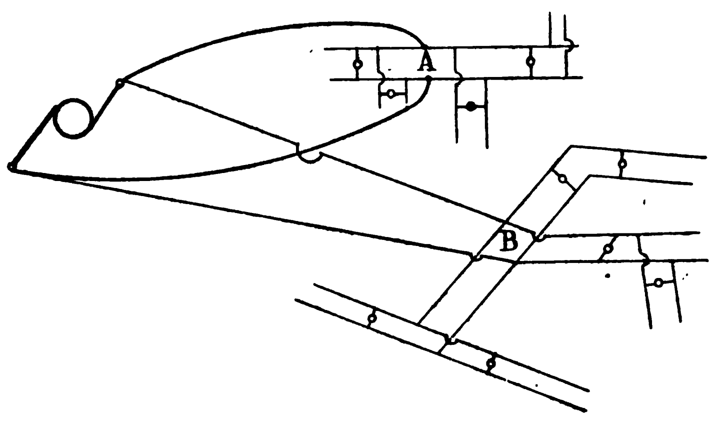


Fig. 135. — Distribution ouverte à deux fils par feeders.

aucune dérivation n'est prise et qui sont directement branchés sur les bornes du tableau.

Les feeders sont établis de telle sorte que la perte de charge soit la même à l'extrémité de chacun d'eux.

Par suite, tous les circuits des lampes, quelle que soit leur distance à la station, sont alimentés sous différence de potentiel constante, et la multiplication du nombre de feeders reliés à chacun d'eux assure le même poten-

tiel à chacun des conducteurs + et — sur lesquels les lampes sont montées.

Les points de jonction des feeders aux circuits des lampes s'appellent centres d'alimentation ou de distribution.

Bien que les sections des feeders aient été calculées de façon que la perte de charge à l'extrémité de chacun d'eux, soit la même, la différence de potentiel varie à chaque centre d'alimentation avec le nombre de lampes allumées ; pour compenser ces variations de perte de charge on introduit ou on retire du circuit de chaque feeder une résistance additionnelle empruntée à un rhéostat. Un voltmètre placé à l'usine et dont les bornes sont reliées par deux fils pilotes au centre d'alimentation permet de suivre et de compenser exactement les variations des pertes de charge.

Distribution à deux fils par feeders. — Les circuits des lampes sont à deux fils ; les feeders + sont reliés à l'un et les feeders — à l'autre de ces fils (fig. 136 et 137).

La répartition des feeders sur le trajet du circuit des lampes dépend de la distribution de ces dernières, et elle est faite en sorte que le potentiel de chacun des fils de ce circuit conserve une valeur constante sur toute sa longueur.

Quand, aux heures de faible consommation, la tension aux centres d'alimentation est supérieure à sa valeur normale, on règle les dynamos de telle sorte que l'on puisse retirer toutes les résistances du rhéostat sur le feeder dont le centre d'alimentation est à la tension la plus basse. On équilibre ensuite les autres feeders au moyen de leurs rhéostats.

— Les figures suivantes ci-dessus des variantes du

système de distribution à deux fils par feeders. La section des conducteurs en chaque point sera proportionnelle à l'intensité du courant qui passe.

Distribution à trois fils par feeders. — Comme dans le cas d'une distribution à deux fils, on répartit les lampes sur un circuit particulier, fermé ou ouvert, mais sur chacun des deux ponts du trois fils.

Ces circuits locaux sont alimentés par des feeders en nombre convenable, mais le fil d'équilibre au lieu de revenir à l'usine est relié à un *Egalisateur* de tension placé au centre d'alimentation, extrémité du feeder.

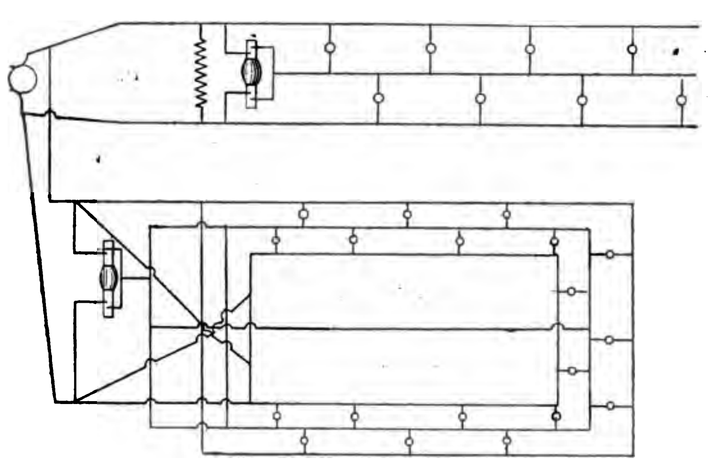


Fig. 136. — Distribution à trois fils par feeders avec égalisateur.

L'Égalisateur est formé de deux induits identiques montés sur le même arbre et tournant dans un même champ formé par des inducteurs ordinaires. Un balai de chaque induit est relié au fil d'équilibre, et les deux autres, chacun à l'un des câbles principaux. Les inducteurs sont également alimentés par ces derniers.

Quand la différence de potentiel est la même de part et d'autre du fil d'équilibre, l'Égalisateur travaille comme moteur sans charge et développe dans chacun des induits une force contre électromotrice, qui fait équilibre à celle qui existe entre le fil d'équilibre et le conducteur principal correspondant.

Si l'on éteint des lampes sur un des ponts, l'induit correspondant reçoit un courant plus intense et marche comme moteur, tandis que l'autre induit fonctionnant comme générateur relève le potentiel sur son circuit et rétablit l'égalité de tension sur les deux ponts.

Distribution à cinq fils par feeders. — Très pratique pour la distribution de l'énergie dans un grand rayon autour de l'usine, comme c'est le cas pour l'éclairage des grandes villes, sa disposition générale rappelle celle de la distribution à trois fils par feeders.

Une seule dynamo alimente les feeders.

Les feeders partent de l'usine et viennent alimenter des circuits locaux à 5 fils : les lampes sont réparties uniformément sur les 4 ponts.

La variation de la consommation sur les ponts entraînant une inégalité dans la perte de charge sur chaque fil on monte à chaque centre de consommation des Egalisateurs de tension.

Chacun d'eux est une dynamo de faible puissance, mais les 4 induits sont manchonnés sur le même arbre et reliés en série entre eux. Les deux balais extrêmes sont branchés aux câbles 1 et 5, et les fils d'équilibre 2, 3, 4 partent chacun d'un des pôles commun des dynamos. Une dérivation sur les conducteurs 1 et 5 alimente les inducteurs.

II. — DISTRIBUTION PAR COURANT CONTINU AVEC ACCUMULATEURS OU TRANSFORMATEURS.

L'adjonction d'accumulateurs ou de transformateurs, ou la combinaison de ces deux éléments permettent de résoudre la question d'une distribution économique par courant continu dans des cas particuliers.

Avec des accumulateurs, on pourra alimenter un réseau que la dynamo génératrice eut été impuissante à desservir seule ; on pourra alimenter un réseau trop éloigné de la station pour que l'on puisse pratiquement canaliser le courant allant directement de la dynamo aux lampes.

Par exemple, une dynamo de 10 chevaux marchant 10 heures par jour sur les accumulateurs pourra desservir pendant 5 heures un réseau absorbant une puissance de 20 chevaux.

Si la distance de la station au centre de consommation est telle qu'en ne consentant qu'à une perte de charge de 10 °/₀, on soit amené à employer des feeders d'un trop gros diamètre, on pourra charger la batterie en *tension* et la décharger en quantité sur les lampes. La dynamo travaillant à haute tension, la ligne pourra être faite d'un fil de faible diamètre.

L'emploi des accumulateurs permet de différer ou non la transformation du courant, et dans le premier cas les batteries serviront de volant de régulateur de la force électro-motrice.

Les transformateurs au contraire agissent instantanément et sont employés surtout quand la distance aux

différents centres dépasse les limites moyennes : ils peuvent, comme on le verra, marcher sur des accumulateurs et différer ainsi la transformation du courant.

Nous allons indiquer les différents modes de montage et de distribution avec accumulateurs et transformateurs.

Distribution par accumulateurs. — Deux cas distincts doivent être considérés : dans le premier, les accumulateurs après avoir été chargés sont branchés sur le circuit des lampes et dans le second, ils travaillent en même temps que la machine.

Premier cas. — Les accumulateurs sont montés en dérivation sur le circuit principal, si l'on considère l'ensemble de l'installation, mais on peut aussi dire qu'ils le sont en série puisqu'au moment de la charge ils sont seuls en circuit.

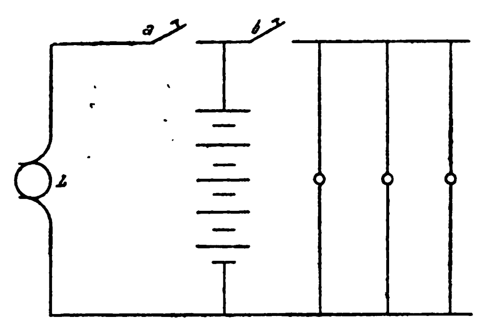


Fig. 137. — Distribution directe par accumulateurs.

Deux interrupteurs *a*. *b*. permettent de mettre à volonté les accumulateurs sur le circuit des lampes ou celui de la machine (fig. 137).

On voit en effet qu'en fermant *a* et en ouvrant *b* la

batterie est en charge et qu'en ouvrant *a* et fermant *b*, la batterie est au contraire mise sur le circuit d'éclairage.

Deuxième cas. — Les accumulateurs peuvent être utilisés simultanément comme *réservoirs* et comme *régulateurs* de la distribution.

Supposons qu'une batterie d'accumulateurs préalablement chargés et une dynamo, l'une et l'autre susceptibles d'alimenter séparément le circuit d'éclairage, soient montées comme l'indique la figure.

Le courant de la dynamo se partagera en deux dérivations, l'une qui traversera les accumulateurs et l'autre qui ira aux lampes. Celui de la batterie parcourra le circuit des lampes (fig. 138).

Si la force électromotrice de la dynamo est constante,

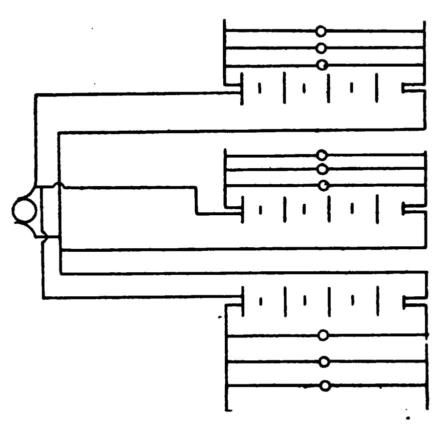


Fig. 138. — Distribution par accumulateurs régulateurs.

le nombre des lampes allumées restant le même, la dynamo et la batterie concourront simultanément à l'alimentation des lampes, et la batterie récupérera à chaque instant l'énergie qu'elle aura distribuée. Mais si,

pour une raison quelconque, la force électromotrice de la dynamo subit des variations, en dessous de sa valeur normale, la fixité d'éclat des lampes ne sera pas altérée, la batterie donnant à ses bornes une différence de potentiel constante et précisément égale à celle que nécessite le bon fonctionnement des récepteurs.

Un conjoncteur disjoncteur automatique s'opposera à ce que la batterie se décharge sur la dynamo.

Cette application des accumulateurs comme *régulateurs* est très employée.

— Les batteries peuvent aussi jouer le rôle de régulateurs dans le cas d'une distribution par *centres*.

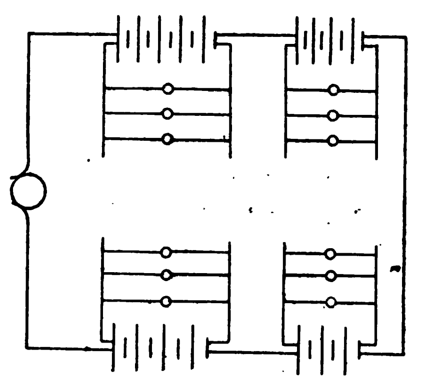


Fig. 139. — Distribution avec sous-station d'accumulateurs.

Elles sont montées en série (fig. 139) sur le conducteur de charge, et les circuits des lampes sont pris, soit sur des points convenables des batteries, soit sur les conducteurs de charge de part et d'autre d'une batterie.

Les dynamos de la station marchent bien entendu pendant toute la durée des heures d'éclairage.

La régulation du courant dans chaque centre se fait soit à l'aide d'un rhéostat monté sur le circuit de distribution, soit par la manœuvre d'un *réducteur* qui augmente ou réduit le nombre d'éléments en circuit sur les lampes.

Si la distribution s'opère sur une grande étendue, on pourra créer des centres de distribution et placer une batterie d'accumulateurs dans chacun d'eux.

Pour parer aux accidents et assurer un service ininterrompu, on est contraint souvent de mettre dans chaque centre deux batteries semblables dont l'une est en charge tandis que l'autre débite sur les lampes.

Si les dispositions locales s'y prêtent, on chargera les batteries en série et l'on réalisera de ce fait une grande économie sur le poids de cuivre du circuit de charge qui travaillera avec une intensité seulement égale à celle requise par une batterie.

La distribution par accumulateurs répartis dans des centres de distribution entraîne des frais de premier établissement considérables et n'est que rarement employée.

Distribution à trois fils par accumulateurs. — Ce

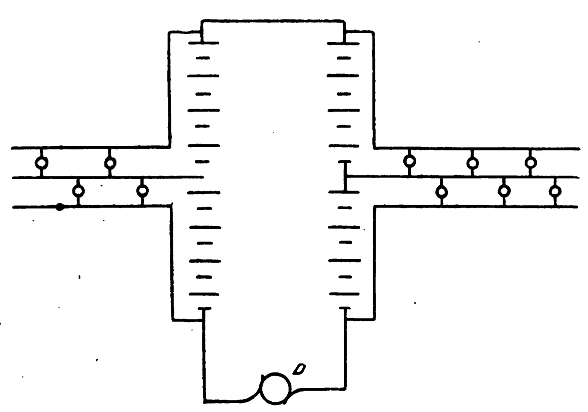


Fig. 140. — Distribution à trois fils par accumulateurs.

système préconisé par M. Monnier a été appliqué à l'éclairage de l'opéra de Vienne.

Deux batteries semblables, pouvant chacune donner une différence de potentiel suffisante (fig. 140) au service des lampes, sont montées en série sur la dynamo de charge.

Le circuit d'éclairage comprend deux conducteurs partant chacun d'un des pôles extrêmes du groupe de batteries, et un fil d'équilibre branché sur le pôle commun des batteries.

Les lampes sont réparties sur les deux ponts.

Deux réducteurs permettent de modifier simultanément le nombre des éléments en charge et celui en circuit sur les lampes.

Distribution par transformateurs a courant continu. — Ces transformateurs trouvent leur emploi quand la distance de la station au centre de consommation est trop considérable pour que le courant puisse être produit à l'usine sous sa tension d'utilisation.

Ils permettent la réalisation de plusieurs modes de distribution que nous allons examiner successivement.

Premier cas. — Un transformateur est placé dans chaque centre de distribution locale et alimenté par un circuit spécial à haute tension (fig. 141).

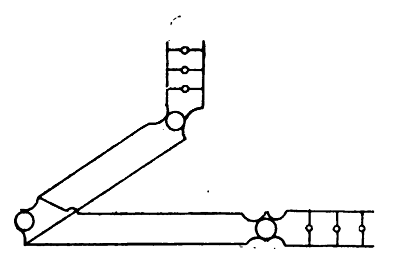


Fig. 141 — Distribution en dérivation par transformateur.

Le circuit des lampes est branché sur les balais de l'induit à basse tension.

Deuxième cas. — Chaque centre de consommation possède en outre du transformateur une batterie d'accumulateurs : cette dernière peut être employée soit

comme transformateur différé, soit comme transformateur instantané : dans ce dernier cas, elle joue le rôle de régulateur (fig. 142).

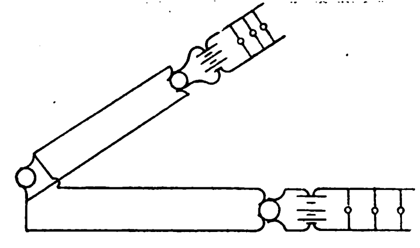


Fig. 142. — Distribution en dérivation par transformateurs et accumulateurs.

Troisième cas. — Distribution en série alimentée par transformateurs en série. — La génératrice alimente tous les transformateurs : les inducteurs et l'induit à haute tension sont en série sur le circuit de la génératrice : l'in-

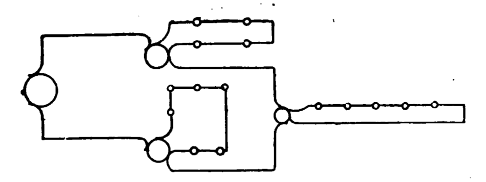


Fig. 143. — Distribution en série par transformateurs.

duit à tension réduite alimente les lampes montées en série (fig. 143).

Distribution en dérivation par transformateurs à courant continu. — Cette disposition est applicable à l'alimentation d'un réseau dont la charge est variable.

La station génératrice renfermera des dynamos couplées en quantité sur le circuit principal, et les sous-stations des transformateurs excités en dérivation et branchées en quantité sur les câbles principaux.

Rappelons qu'un moteur en dérivation branché sur un circuit à potentiel constant, reçoit dans ses induc-

teurs un courant constant, que sa puissance est maximum au démarrage et diminue en même temps que la charge, au fur et à mesure que sa vitesse augmente, et qu'il tend à conserver une vitesse constante.

On maintient cette dernière constante aux transformateurs en agissant sur leur champ magnétique avec un rhéostat. La régulation par la variation de la résistance du circuit extérieur total n'est pas pratique.

Un moteur série ne démarrant qu'autant que sa charge ne dépasse pas un certain taux, la mise en marche ne pourra s'opérer sans quelques précautions. On peut coupler l'induit à haute tension sur une batterie d'accumulateurs, et quand la vitesse a pris à peu près sa valeur normale, intercaler l'induit primaire sur le circuit extérieur : le transformateur est prêt à marcher sur les lampes. La vitesse du transformateur devra varier dans le même sens que la charge, et l'on réalisera cette condition en alimentant par une génératrice en série des transformateurs excités et groupés en série.

III. — DISTRIBUTION PAR COURANTS ALTERNATIFS

Les courants alternatifs n'étant, en principe, employés qu'autant que la station est très éloignée du centre de consommation, le courant de la génératrice est, dans ce cas, produit sous une tension de plusieurs milliers de volts.

Dans ces conditions le courant ne peut être employé que pour alimenter un nombre *convenable* de récepteurs en *série*, ou un réseau en dérivation avec le concours de transformateurs.

DISTRIBUTION DIRECTE

Courants alternatifs ordinaires. — Le cas d'une distribution en série sur les lampes est identique à celui que nous avons examiné avec les courants continus, et nous n'y reviendrons pas.

Reste le cas d'une distribution avec transformateurs en série sur les câbles principaux.

Un seul et même circuit, celui qui part de la génératrice alimente les transformateurs dont les primaires sont en série, et dont les secondaires desservent les récepteurs sous la tension voulue (voir page 321).

Distribution directe par courants polyphasés. — Ces courants se prêtent comme les courants alternatifs simples à la distribution directe et à la distribution indirecte avec le concours de transformateurs appropriés.

Courants triphasés. — Si l'on adopte le montage sim-

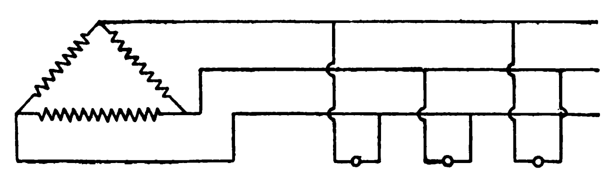


Fig. 144. — Montage en triangle.

ple en triangle, les lampes seront également réparties sur les deux ponts (fig. 144).

La figure 145 donne la disposition d'un montage de lampes à arc sur un circuit triphasé en étoile.

Cette disposition n'est applicable qu'avec des lampes à arc : si le réseau alimente des lampes à incandescence, on doit pour maintenir la différence de potentiel constante aux bornes ajouter un quatrième fil de *compensa-*

tion et adopter le montage en étoile (fig. 146). Toutes les

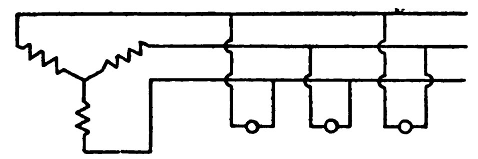


Fig. 145. — Montage en étoile.

lampes auront une borne sur le *compensateur* et elles seront également réparties sur les trois autres fils.

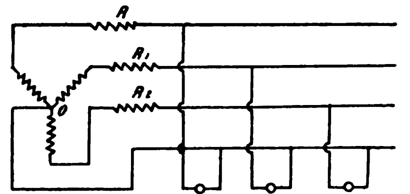


Fig. 146. — Montage de lampes à incandescence.

Le fil compensateur part du point commun O aux trois circuits ;

Les conducteurs principaux portent chacun une résistance R qui permet de régler la perte de charge sur la ligne.

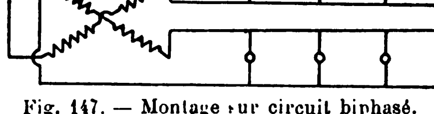


Fig. 147. — Montage sur circuit biphasé.

Courants biphasés. — Si la ligne est 4 fils, les lampes seront montées sur les ponts extrêmes comme l'indique la figure 147.

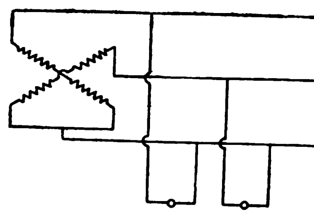


Fig. 148. — Montage sur circuit biphasé.

Si la ligne ne comprend que 3 fils, l'un d'eux correspondant aux deux fils extrêmes *réunis* de la figure précédente, les lampes seront montées en dérivation entre ce fil *double* et les deux autres, et également réparties sur ces derniers (fig. 148).

DISTRIBUTION INDIRECTE

Courants alternatifs ordinaires. — Le service des lampes d'abonnés ne peut être assuré qu'à basse tension si l'on veut éviter les accidents : on fait alors usage de transformateurs qui peuvent être montés en série ou en dérivation sur les câbles principaux.

La seconde disposition est employée de préférence pour éviter de rendre tous les appareils solidaires les uns des autres.

Distribution par transformateurs en série. — Dans ce mode de distribution, les circuits primaires de tous les transformateurs sont montés en série sur le circuit à haute tension de la dynamo. Les circuits secondaires travaillent soit isolément, soit groupés pour le service des circuits d'abonnés, comme le montre la figure 149.

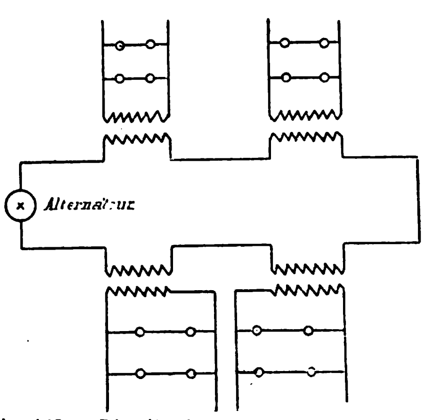


Fig. 149.— Distribution par transformateurs en série.

On peut éviter qu'aucun transformateur ne se trouve en circuit ouvert en utilisant comme interrupteurs des lampes des dispositifs qui les mettent en court circuit quand on les éteint : Le secondaire qui ne présente qu'une petite résistance ne produit alors qu'une faible dépense d'énergie.

Le contact accidentel des charbons des lampes n'entraînant pas une augmentation notable de l'intensité du courant, il est inutile d'ajouter aux lampes une bobine de réaction ou des résistances additionnelles.

Distribution par transformateurs en dérivation. — Dans une distribution sous potentiel constant, les transformateurs sont montés en dérivation sur les câbles de la ligne principale (fig. 150).

Les secondaires de deux ou plusieurs transformateurs

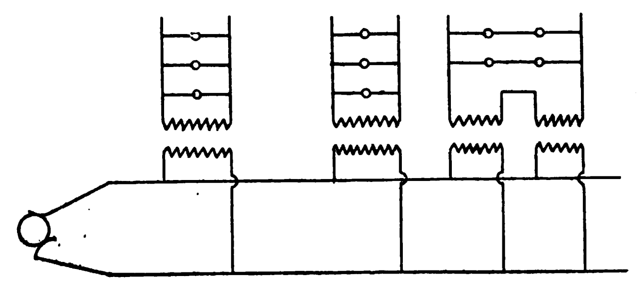


Fig. 150. — Distribution par transformateurs en dérivation.

peuvent être groupés en série pour alimenter des lampes à plus haut voltage.

Distribution mixte. — Un alternateur peut simultanément alimenter deux circuits distincts desservant, l'un

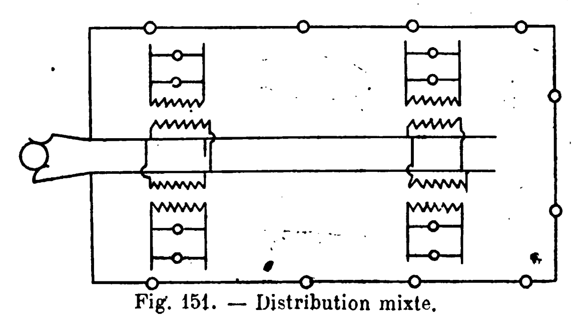


Fig. 151. — Distribution mixte.

des transformateurs en dérivation, et l'autre des récepteurs en série sans transformateurs.

La figure 151 montre cette disposition.

Les transformateurs peuvent être montés tous en dérivation sur le circuit principal qui joue le rôle de feeders, et débiter sur un circuit secondaire sur lequel les récepteurs sont branchés en dérivation (fig. 152).

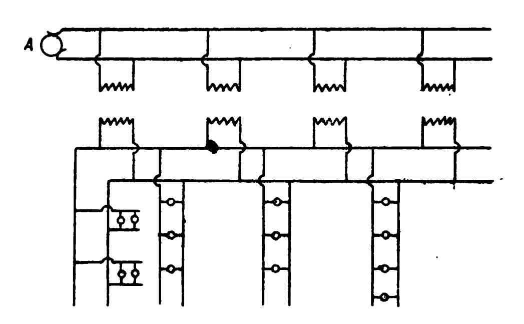


Fig. 152. — Distribution en dérivation par feeders.

Distribution à trois fils par transformateurs. — On a vu que si deux transformateurs semblables ont leurs primaires montés en dérivation sur les conducteurs principaux et leurs secondaires couplés en série, on obtient sur le circuit secondaire une force électromotrice double de celle développée par l'un des transformateurs.

Pour réaliser la distribution à trois fils, on couplera deux à deux en série les secondaires des transformateurs et l'on montera un fil d'équilibre sur la borne de jonction des secondaires (fig. 153).

Les lampes seront réparties sur chaque pont.

On obtiendrait le même résultat en prenant un transformateur développant une différence de potentiel double

de celle nécessaire et en montant le fil de compensation sur le milieu du secondaire (fig. 154).

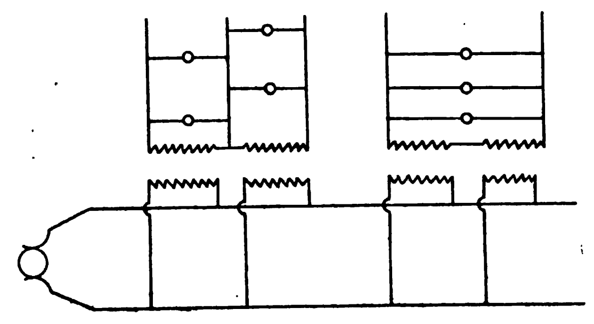


Fig. 153. — Distribution alternative à trois fils.

On obtiendrait le même résultat avec un seul transformateur donnant une force électromotrice double de celle nécessitée par le service, et en montant le fil d'équilibre sur le milieu du circuit secondaire.

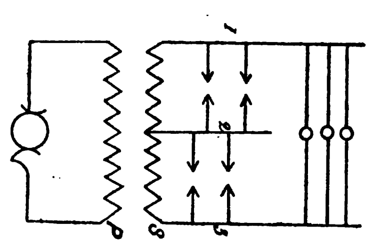


Fig. 154. — Distribution alternative à trois fils.

Distribution à cinq fils par transformateurs. — Deux transformateurs développant chacun une force électromotrice double de celle exigée aux bornes des dérivations ont leurs primaires en dérivation sur les conducteurs principaux.

On établit les trois fils d'équilibre par un branchement sur le milieu du secondaire de chaque transformateur et par un branchement sur la borne de jonction des deux secondaires qui ont été couplés en série.

On obtient ainsi quatre ponts sur lesquels on distribue les lampes (Fig. 155).

Un seul transformateur dont la force électromotrice serait le quadruple de celle nécessitée par le service peut remplacer les deux premiers. On monterait trois fils d'équilibre en trois points du secondaire également distants entre eux. Il va de soi que par 3 points également distants, on entend 3 points répartis sur le secondaire de telle sorte que la force électromotrice développée dans chacune des quatre sections soit la même.

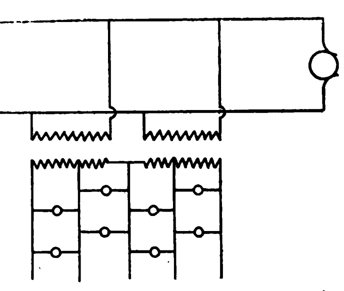


Fig. 155. — Distribution alternative à cinq fils.

Régulation par le transformateur du courant principal dans une distribution en dérivation. — Dans une distribution en dérivation, le transformateur règle de lui-même l'intensité du courant primaire qui lui est fourni par les conducteurs principaux : l'intensité du courant qui circule dans le primaire varie proportionnellement à l'intensité demandée au secondaire par le service des récepteurs, et cela bien que les conducteurs principaux restent en pleine charge.

Si tous les récepteurs du circuit secondaire sont retirés, l'intensité dans le primaire est très réduite.

Ce fait est dû à l'action réciproque du primaire sur le secondaire et le noyau magnétique, et au décalage du courant primaire sur le secondaire.

Distribution indirecte par courants polyphasés. — L'adjonction de transformateurs permet de ramener à sa

valeur normale la tension du courant qui a été surélevée pour réaliser une économie de cuivre sur la canalisation principale.

Les circuits primaires (Fig. 156) des transformateurs T

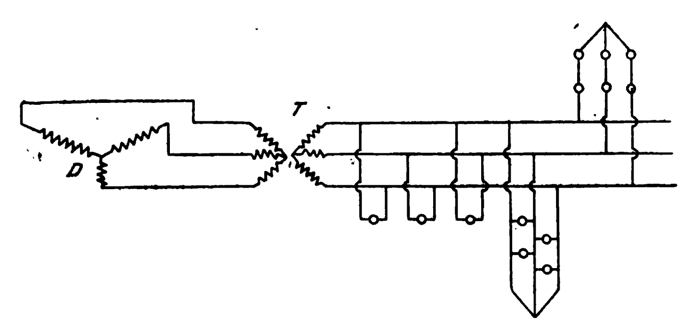


Fig. 156. — Distribution triphasée en dérivation.

seront couplés avec ceux de la machine polyphasée D, en étoile ou triangle si le courant est triphasé, avec ou sans fil commun s'il est diphasé.

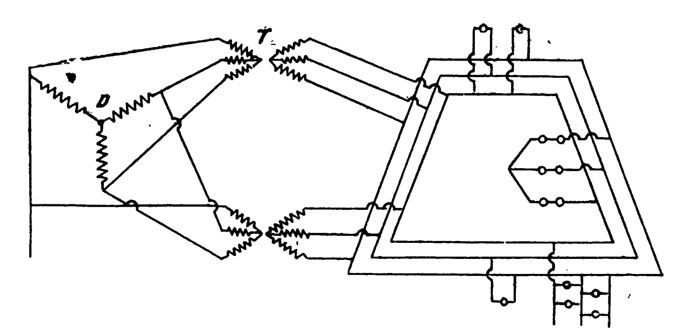


Fig. 157. — Distribution triphasée par feeders.

Les lampes seront montées sur la canalisation secondaire d'après les principes indiqués précédemment, comme s'il s'agissait d'une distribution directe.

Les courants triphasés se prêtent naturellement à la distribution par feeders (Fig. 157).

Les lampes sont réparties sur le circuit local à trois fils qu'alimentent un, deux ou plusieurs transformateurs.

CHAPITRE XII

FILS ET CABLES

MATIÈRES PREMIÈRES. FABRICATION. RENSEIGNEMENTS DIVERS

La fabrication des câbles est une question généralement négligée par les auteurs, et en la traitant nous ajoutons à un intérêt historique la publication de renseignements qui trouvent leur utilité dans la pratique des installations ; nous nous sommes inspirés, dans son exposition, de l'excellent *Traité des lignes et transmissions électriques* de MM. Lazare Weiller et Henry Vivarez.

Il ne suffit pas d'acheter du câble pour bien établir une ligne ; il faut savoir choisir le type de conducteur approprié aux circonstances, connaître ses propriétés mécaniques et physiques, les contrôler à la réception, connaître la *forme* sous laquelle le câble est livré, et enfin relier bout à bout ou latéralement les conducteurs. On a presque toujours besoin, pour exécuter ces raccordements de matériaux de différentes natures, de faire soi-même une matière isolante.

L'objet de ce chapitre est de satisfaire à ces différentes exigences, dont chacune est traitée séparément pour la facilité des recherches.

Le cuivre est la matière première qui sert à la fabrication des fils et câbles de toutes dimensions employés pour canaliser et distribuer l'énergie électrique. Il est

employé soit pur, soit combiné à d'autres corps simples sous forme d'alliages.

Il doit cette préférence par rapport aux autres métaux à sa haute conductibilité électrique, à sa résistance à l'attaque des agents chimiques de l'atmosphère, à sa ductilité et à ses autres propriétés physiques qui permettent de l'enrouler et de le redresser sans produire de fissures.

Il est livré aux fabricants de câbles sous forme de fils et de barres préparés dans les fonderies et tréfileries ; nous n'examinerons pas cette première phase de la fabrication.

Choix du cuivre. — Tous les cuivres ne sont pas propres à la fabrication des câbles électriques, car il suffit de la présence en quantité minime de quelques impuretés, telles que l'arsenic, le soufre, l'antimoine, pour faire perdre au métal ses qualités de haute conductibilité.

Les cuivres généralement employés proviennent soit des mines du Lac Supérieur aux États-Unis, soit des affineries de cuivre électrolytique.

Le *cuivre du Lac* ne contient pas d'arsenic, de soufre ni d'antimoine ; il renferme seulement 2 à 3 dix millièmes d'argent et quelquefois des traces de nickel, de fer et de zinc. Le métal est à peu près pur.

En 1887, les mines du Lac ont produit 23 600 tonnes de métal sur une production totale du district évaluée à 36 000 tonnes.

Les cuivres électrolytiques doivent leur pureté au mode même de leur fabrication. Ils sont préparés par le traitement de cuivres noirs à 85 % de cuivre au minimum, et de *mattes riches* à 53 % de cuivre. Les *mattes pauvres* ne renfermant que 15 à 50 % de cuivre, donnent un cuivre de qualité inférieure.

Les principales maisons européennes qui fabriquent le cuivre électrolytique sont la Norddeutsche Affinerie à Hambourg, la Société Française d'Électrométallurgie à Dives, la maison Grammont à Pont de Chéruy (Isère), l'usine d'Aiguilles près Isle sur la Sorgue.

On reconnaît la qualité d'un cuivre électrolytique à la grosseur de son grain ; plus le grain est fin, meilleur est le métal.

Le dépôt du métal sur les moules doit être fait très lentement, par le traitement, à la température de 15° C d'une solution à 18 °/₀ de sulfate de cuivre par un courant de densité égale à 1 ampère par décimètre carré.

Ce régime correspond à peu près à la formation d'un dépôt de 4 millimètres d'épaisseur par 156 heures de travail.

Le cuivre électrolytique est livré aux fondeurs sous forme de plaques ; les fondeurs le livrent aux fabricants de câbles soit sous forme de barres soit en bottes de fils en forme de tores pour les diamètres permettant ce bobinage.

Les *bottes* ou *couronnes* pèsent de 2 à 20 kilogrammes et sont emballées dans des tonneaux qui en contiennent 300 kilogrammes.

Réception des fils. — Dans chaque tonneau on prend 5 couronnes et sur chacune d'elles on prélève une longueur de fil de 5 mètres exactement. On pèse les bouts de fil, et leur poids divisé par 25 donne le poids moyen de chacun d'eux par mètre : on déduit de cette mesure le diamètre du fil.

Si le fil a été commandé à un diamètre déterminé, et qu'entre le résultat trouvé et le diamètre théorique il existe un écart supérieur à 1/100, on répète l'ex-

périence sur 5 nouvelles couronnes ; quand on a trouvé le fil du diamètre voulu, on mesure sa conductibilité sur un bout de 100 mètres de long que l'on enroule sur un tambour isolant sans que ses spires se touchent entre elles.

On calcule sa résistance théorique R_t en la comparant à la résistance R d'un fil de 100 mètres de long pesant un gramme au mètre, à la même température. Le fil ayant un diamètre d et une densité supposée de 8,9, on aura

$$R_t = \frac{400\ R}{\pi d^2 8,9}.$$

On obtiendra la *conductibilité* du fil en divisant R_t par la résistance trouvée expérimentalement.

Section des fils. — La section cylindrique est préférable à toutes les autres : à égalité de section droite, elle présente le pourtour minimum et économise par suite la matière isolante à apposer s'il y a lieu.

La capacité électrostatique d'un conducteur cylindrique est aussi minima, à égalité de section.

Étamage. — Le caoutchouc renferme du soufre qui provient de la *vulcanisation*, et il attaque les objets de cuivre qu'il enveloppe.

Pour éviter que pareil inconvénient se produise avec des câbles isolés au caoutchouc, on place une couche intermédiaire inattaquable : jusqu'ici on a employé l'étain.

On effectue l'étamage en faisant traverser au fil un bain d'étain en fusion avec une vitesse proportionnée à l'épaisseur du dépôt à obtenir.

A sa sortie du bain d'étain le fil passe dans une gaîne

d'amiante qui enlève l'excès d'étain et polit la surface extérieure du conducteur.

Mesure du diamètre des fils. — Cette importante détermination se fait avec des instruments très simples si l'on n'a pas affaire à des fils fins : elle s'évalue en dixièmes de millimètre.

On dit qu'un fil à 30/10 de millimètre de diamètre au lieu de dire 3 millimètres de diamètre.

Palmer. — Cet instrument très précis est le plus répandu.

Il est formé d'une vis à pas très fin et très régulier, dont la pointe est dressée normalement à l'axe (Fig. 158).

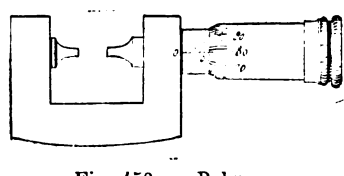


Fig. 158. — Palmer.

La tête de la vis porte un bouton moleté monté à frottement doux, de telle sorte qu'il tourne sur lui-même quand la vis bute sur le fil avec une pression déterminée. C'est par ce bouton que l'on opère l'avancement de la vis dont l'écrou est l'une des branches d'un fer à cheval ; l'autre branche sert de butoir.

Dans son mouvement la vis découvre une graduation en demi-millimètres gravée sur l'écrou et que complète un vernier tracé sur un manchon.

La lecture de la partie visible de l'échelle, complétée au besoin par le jeu du vernier, mesure le mouvement d'avancement ou de recul de la vis.

Pour mesurer le diamètre d'un fil, on place celui-ci sur le butoir et l'on amène la vis au contact : la lecture de l'échelle donne le diamètre cherché, le zéro correspondant au contact sur le butoir.

Pour être précise, cette mesure doit être faite sur plusieurs points, et, en chacun d'eux, suivant deux diamètres rectangulaires.

Le vernier permet de mesurer avec une approximation de 1/2 centième de millimètre.

Dans certains palmers la graduation représente non plus le diamètre, mais la section du fil.

Jauges. — On se sert aussi de *jauges* (jauge de Paris ou de Limoges).

C'est un disque en acier bombé et portant à sa circonférence une série d'ouvertures : à côté de chaque ouverture se trouve un numéro exprimant en dixièmes de millimètre le diamètre du fil (Fig. 159).

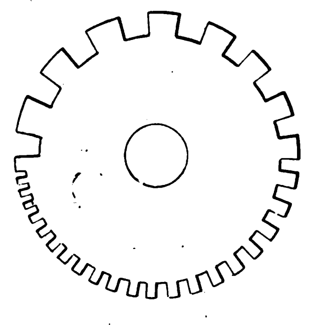


Fig. 159. — Jauge.

On prend la mesure en cherchant l'ouverture dans laquelle le fil à mesurer peut pénétrer à frottement doux.

Jauge carcasse. — Elle se rapporte aux fils très fins, et ses numéros correspondent aux diamètres ci-après :

Numéro	Diamètre en mm.	Numéro	Diamètre en mm.
10	0,53	34	0,14
12	0,48	35	0,13
14	0,44	36	0,12
16	0,40	37	0,115
18	0,36	38	0,11
20	0,32	39	0,105
22	0,28	40	0,10
24	0,25	41	0,095
25	0,23	42	0,09
26	0,22	43	0,085
27	0,21	44	0,08
28	0,20	45	0,075
29	0,19	46	0,07
30	0,18	47	0,065
31	0,17	48	0,06
32	0,16	49	0,055
33	0,15	50	0,05

Standard wire-gauge. — Très usitée en Angleterre, cette jauge a la même forme que celle de Paris, mais les numéros placés en regard des ouvertures correspondent à un *numéro* de fil.

Le tableau ci-dessous donne le diamètre en millimètres des fils pour chaque numéro de ladite jauge.

Numéro de la S. W. G.	Diamètre du fil en millimètres	Numéro de la S. W. G.	Diamètre du fil en millimètres
0000000	12,7	8	4,1
000000	11,8	9	3,7
00000	11	10	3,3
0000	10,2	11	3
000	9,4	12	2,6
00	8,8	13	2,3
0	8,2	14	2
1	7,6	15	1,8
2	7	16	1,6
3	6,4	17	1,4
4	5,9	18	1,2
5	5,4	19	1
6	4,9	20	0,9
7	4,5		

*Équivalence des nos de l'*Imperial Standard Wire Gauge *et de la* Jauge américaine *en millimètres et fractions de millimètres, et en pouces.*

Numéros	Jauge anglaise		Jauge américaine	
	Diamètres en pouces	Diamètres en millimètres	Diamètres en pouces	Diamètres en millimètres
7/0	0,500	12,000		
6/0	0,464	11,785		
5/0	0,432	10,973		
4/0	0,400	10,160		
3/0	0,372	9,449		
2/0	0,348	8,839		
0	0,324	8,229	0,325	8,255
1	0,300	7,620	0,289	7,340
2	0,276	7,010	0,258	6,553
3	0.252	6,401	0.229	5,816
4	0.232	5,893	0.204	5,181
5	0.212	5 385	0,182	4,612
6	0.192	4,877	0,162	4,114
7	0.176	4,470	0,144	3,657
8	0.160	4,064	0,128	3 251
9	0,144	3,658	0,114	2,895
10	0.128	3,251	0,102	2,590
11	0.116	2,946	0,091	2 311
12	0,104	2,642	0,081	2,057
13	0,092	2 337	0.072	1,828
14	0,080	2,032	0,064	1,625
15	0,072	1 829	0,057	1,447
16	0,064	1,626	0,051	1,295
17	0,056	1,422	0,045	1,143
18	0,048	1,219	0,040	1,016
19	0,040	1,016	0,036	0,914
20	0,036	0,914	0,032	0,812
21	0,032	0,813	0,028	0,711
22	0,028	0,711	0,025	0,635
23	0,025	0,610	0,0225	0,571
24	0,0225	0,559	0,020	0,508
25	0,020	0,508	0,018	0,457
26	0,018	0,457	0,016	0,406
27	0,0164	0,416	0,014	0,355
28	0,0148	0,376	0,013	0,330
29	0,0136	0 345		
30	0 0124	0,315		
31	0,0116	0 294		

*Equivalence des nos de l'*Imperial Standard Wire Gauge *et de la* Jauge américaine *en millimètres et fractions de millimètres, et en pouces* (suite).

Numéros	Jauge anglaise		Numéros	Jauge anglaise	
	Diamètres en pouces	Diamètres en millimètres		Diamètres en pouces	Diamètres en millimètres
32	0,0118	0,274	42	0,0040	0,101
33	0,0100	0,254	43	0,0036	0,091
34	0,0092	0,233	44	0,0032	0,081
35	0,0084	0,213	45	0,0028	0,071
36	0,0076	0,193	46	0,0024	0,061
37	0,0068	0,172	47	0,0020	0,0508
38	0,0060	0,152	48	0,0016	0,0400
39	0,0052	0,132	49	0,0012	0,0305
40	0,0048	0,122	50	0,0010	0,0254
41	0,0044	0,111			

Il est à souhaiter que les pays civilisés adoptent une même terminologie pour exprimer le diamètre ou la section des fils. L'adoption de cette mesure faciliterait les transactions et l'intelligence des travaux publiés à l'étranger.

Voici quelques formules pratiques relatives au cuivre :

Charge de rupture 26,7 kilogrammes par millimètre carré. Résistance spécifique du cuivre pur recuit à 15° C, 1,69 microhm-cm. Résistance spécifique du cuivre pur recuit à 24° C, 1,75 microhm-cm.

Si l'on représente par d le diamètre en millimètres d'un fil cylindrique,

Le nombre de mètres au kilogramme sera. . . . $\frac{143}{d^2}$

Le poids en grammes par mètre. . . . . $6,99\ d^2$

La résistance en ohms par kilomètre à 15° C . . . $\frac{21,52}{d^2}$

— — — à 24° C . . . $\frac{22,23}{d^2}$

Alliages de cuivre. — Deux échantillons pris dans

une même barre de cuivre pur puis fondus par des procédés ou dans des conditions différents pourront présenter des conductibilités très inégales. Cette anomalie provient de la formation d'oxydule de cuivre si le métal n'est pas protégé contre l'oxydation.

On a cherché à éviter la production d'oxydule, ou plus exactement à le détruire au fur et à mesure de sa production. Ce résultat s'obtient par l'action du phosphore, du silicium ou du chrôme.

Bronze phosphoreux. — On ajoute au cuivre en fusion une petite quantité de phosphure de cuivre.

L'oxydule est réduit et le métal présente une dureté qui le fait employer, en dehors de son usage spécial à la canalisation de l'énergie électrique, à faire des coussinets, des plaques de tiroirs, etc.

Voici ses propriétés :

Résistance à la rupture par millimètre carré . .	90 kg
Résistance par kilomètre d'un fil de 1 millimètre de diamètre.	60 ohms.
Conductibilité rapportée à celle du cuivre pur . .	30 °/₀
Poids par kilomètre d'un fil de 1 millimètre de diamètre.	6,63 kg

Le bronze phosphoreux renferme de l'étain.

Il permet d'employer des portées de 500 mètres.

Bronze silicieux. — On projette dans le bain de cuivre une quantité convenable d'un mélange de fluosilicate de potasse et d'une combinaison de sodium avec le cuivre, le bronze ou l'étain. Il se produit du silicium qui se combine avec le cuivre, et on peut atteindre la proportion de 12 °/₀ de silicium dans le métal définitif.

Il est meilleur conducteur que le bronze posphoreux ; le tableau ci-après résume ses constantes :

Résistance à la rupture par millimètre carré . .	70 kg
Résistance par kilomètre d'un fil de 1 millimètre de diamètre	34 ohms
Conductibilité, celle du cuivre pur étant 100, . .	61
Poids par kilomètre d'un fil de 1 millimètre de diamètre.	6,31 kg

On peut augmenter sa conductibilité en diminuant sa résistance à la rupture. Ainsi un fil dont la résistance à la rupture sera de 45 kg par millimètre carré aura une conductibilité de 97 à 99 par rapport à celle du cuivre pur prise égale à 100.

CABLES ET FILS NUS

Les câbles non isolés, c'est-à-dire faits de métal nu, sont très employés tant pour les lignes aériennes que pour les lignes souterraines, à moins que le courant ne soit à haute tension ; dans ce dernier cas, il convient d'employer des câbles reçouverts d'une ou plusieurs couches de matière isolante suivant les cas.

Les premiers sont dits *nus* et les seconds *isolés*.

Si l'intensité du courant à canaliser est faible, la section du conducteur sera réduite et l'on pourra utiliser un *fil*.

Au-dessus d'un diamètre de 5 à 6 millimètres le fil est difficile à manier, à courber suivant les exigences du tracé de la ligne; c'est une véritable barre qui exige des conditions spéciales de pose.

Aussi a-t-on généralement substitué à ces barres un assemblage de lames ou de fils de façon à conserver au câble sa flexibilité tout en lui donnant une section en rapport avec les besoins de la distribution.

Nous aurons donc à examiner :

les *Barres.*

les *Câbles faits de bandes de métal.*

les *Câbles faits de fils cylindriques,* qui se subdivisent en :

Câbles à un toron.

Câbles à plusieurs torons.

Câbles en grelin.

Barres. — Employées en Amérique, ces barres sont préparées en bouts de 6 à 7 mètres de longueur, et de section triangulaire, circulaire ou demi-circulaire.

Câbles faits de bandes. — Cette disposition a reçu quelques applications en France, notamment à Paris et à Perpignan.

Le conducteur est fait d'un nombre convenable de bandes de cuivre de mêmes dimensions, et dont les extrémités sont étamées et munies de deux encoches.

Pour réunir deux tronçons successifs du câble, on place d'abord en regard les encoches de chacun d'eux, et on amène les deux tronçons au contact en ayant soin de mettre en présence les encoches des extrémités des parties à réunir.

On passe ensuite dans chacune des deux rainures ainsi constituées une tige munie à ses deux extrémités d'un boulon de serrage, et l'on assure par une pression convenable le parfait contact des deux tronçons.

La canalisation de Perpignan est faite de bandes de 3 millimètres d'épaisseur sur 20 millimètres de largeur.

A Paris, sur le secteur de la Société *pour la transmission de la force*, les bandes présentent les dimensions suivantes :

Longueur	*Largeur*	*Épaisseur*
1,08 m	113 m	de 7,5 à 2 mm
4,08 —	103 —	7,5
6,08 —	96 —	7,5 à 2 —
10,08 —	86 —	7,5 à 7 —
	75 —	5
	73 —	7,5 à 2 —
	36 —	5 à 2 —

Câbles en Fils. — Les câbles proprement dits, faits par la réunion de fils cylindriques de petit diamètre, sont toujours souples, quelque grande que soit leur section. D'autre part, en soudant bout à bout deux câbles, ou leurs éléments, pendant le cours même de leur fabrication, on peut obtenir un conducteur d'une longueur quelconque : néanmoins on est limité par la facilité de la manœuvre des bobines dont le poids ne dépasse généralement pas 2 000 kg.

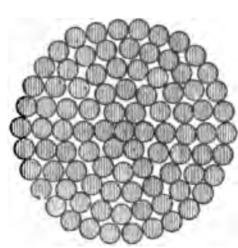


Fig. 160. — Câble à un toron.

Les raisons ci-dessus font préférer ce genre de câbles aux précédents.

Câbles à un seul toron. — Leur forme extérieure est cylindrique et par suite le pourtour est minimum pour une section donnée.

Ils sont formés par la superposition de couches successives de fils, chaque couche étant tordue en sens inverse de la précédente (Fig. 160).

Au centre se trouve un fil tendu droit, ou applique, sur lequel sont superposées les couches supérieures, comprenant successivement 6, 12, 18, 24, 30 fils.

Le pas de l'hélice tracée par un fil est de 9 fois le diamètre du câble, y compris la couche à enrouler.

La longueur réelle des fils est réduite de 5 °/₀ par ce câb age.

On ne dépasse généralement pas un nombre total de 91 fils ; s'il y avait lieu de le faire, on devrait recourir à plusieurs torons.

Câbles à plusieurs torons. — Si l'on tord ensemble plusieurs torons, on réalise cette espèce de câble très employée pour les fortes intensités (Fig. 161).

Fig. 161. — Câble à plusieurs torons.

Le pas de l'hélice tracée par un toron est de 9 fois le diamètre du câble, l'épaisseur de ce toron étant comprise : la longueur réelle des fils simples est réduite de 10 pour cent.

Câbles en grelin. — Un câble fait par le câblage de plusieurs câbles formés chacun de plusieurs torons est dit en *grelin* (Fig. 162).

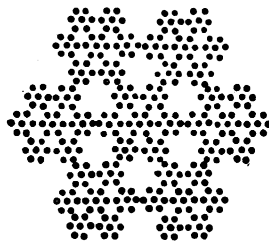


Fig. 162. — Câble en grelin.

Cette disposition réduit de 16 pour cent la longueur réelle des fils simples.

POIDS D'UN CABLE. — Les formules suivantes permettent de calculer le poids d'un câble appartenant à l'une des trois catégories de câbles toronnés.

Soient :

n le nombre de brins du câble,
R le rayon de chaque brin supposé cylindrique,
L la longueur du brin redressé,
8,9 la densité du cuivre,
F le poids à calculer ;

on aura :

$$F = n \pi R^2 L\, 8{,}9.$$

On aura la valeur de L en fonction de la longueur L_1 du câble en tenant compte de la réduction indiquée plus haut pour chacune des catégories, soit :

pour un câble à un seul toron $L = 1{,}05\, L_1$
— — — — plusieurs — $L = 1{,}10\, L_1$
— — — en grelin $L = 1{,}16\, L_1$.

Le *poids kilométrique* est donné par les relations :

pour un câble à un seul toron $F_{km} = 9{,}305\ \pi R^2 n$
— — — — plusieurs — $F_{km} = 9{,}79\ \pi R^2 n$
— — — en grelin $F_{km} = 10{,}32\ \pi R^2 n$.

On peut, sans grande erreur, appliquer en pratique la formule

$$F_{km} = 10\ \pi R^2 n$$

pour les trois cas.

Couronnes. — *Tourets.* — Les câbles de petit diamètre et de faible longueur sont livrés en *couronnes*. Le

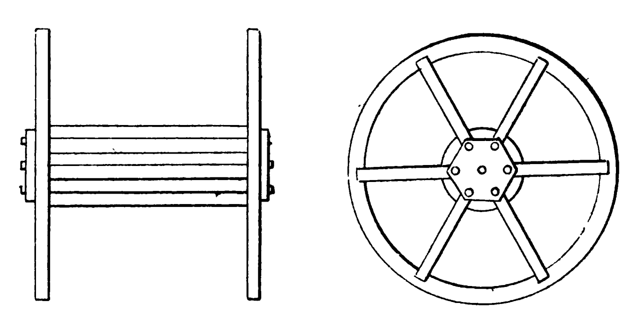


Fig. 163 et 164. — Touret.

câble est enroulé sur lui-même en couches superposées et la couronne a la forme d'un tore.

Lorsque le câble présente un poids élevé, on le livre enroulé sur un *touret* (Fig. 163-164).

Le touret est formé d'un cylindre sur lequel le câble est enroulé : deux joues d'une hauteur convenable s'opposent au glissement du câble sur son support.

Généralement le cylindre est percé suivant son axe et le touret est livré avec une barre de fer qui servira d'axe de rotation : cette disposition permet de dérouler le câble sans le déformer.

Voici les dimensions des Tourets de la *Corderie centrale* :

Numéro	Diamètre en m		Largeur entre joues en m.	Diamètre max. des câbles qu'ils peuvent recevoir, en mm.	Poids max. des câbles, en kg.
	des joues	du tambour			
1	1	0,31	1	40	2000
2	1	0,31	0,75	35	1500
3	0,75	0,31	0,75	30	1000
4	0,75	0,31	0,50	25	600
5	0,60	0,25	0.50	20	400
6	0,50	0,25	0,40	15	200

Fils compound. — De nombreux inventeurs ont cherché à fabriquer des fils composés de deux métaux appropriés, dont l'un est déposé à la surface de l'autre, pour obtenir un fil jouissant des qualités de l'un et de l'autre des composants.

Un fil d'acier recouvert de cuivre représente le fil *compound* le plus simple.

Les inventeurs des fils compound sont Moses Farmer,

de Salerne, et Milliken de Boston, qui prirent pour cet objet un brevet en Amérique le 30 mai 1865.

De nombreuses patentes ont été depuis délivrées notamment à Edouard Martin, le fondateur des Tréfileries de Joinville-le-Pont, rendues tristement célèbres par l'explosion de chaudières qui s'y produisit au mois de février 1895.

En France, les Tréfileries de Joinville-le-Pont, la société Lazare Weiller et Cie et autres fabriquent les fils compound dits aussi *bi-métalliques*.

En principe, le fil compound est fait d'un conducteur cylindrique généralement en acier, recouvert de cuivre.

On obtient ce résultat en laminant ensemble une tige d'acier recouverte d'une gaîne de cuivre.

On peut compounder un câble de cuivre fait de plusieurs torons et donner aux parties constituantes, entre elles et avec la gaîne, telles dispositions que comporte la destination spéciale du câble.

On fabrique des fils compound présentant une résistance de 80 kg par millimètre carré et une conductibilité de 60 °/₀ de celle du cuivre pur, à égalité de section ; on en fait aussi qui, pour une résistance à la rupture de 120 kg par millimètre carré, ont une conductibilité de 35 à 40 °/₀ de celle du cuivre.

Un troisième type correspond à une résistance à la rupture de 55 kg par millimètre carré et à une conductibilité de 80 à 85 °/₀.

Les fils compound à âme d'acier recouverte de cuivre possèdent donc l'avantage de présenter, à égalité de conductibilité, une résistance à la rupture supérieure à celle des fils de cuivre.

Tableau donnant, de 2 millimètres à 4 millimètres, les diamètres, sections, masses linéaires, résistances linéaires et ténacités des fils bi-métalliques du type O Lazare Weiller.

Conductibilité : 80 %. — Ténacité : 60 kg par millimètre carré.

Diamètre en millimètres	Section correspondante en mm2	Masse linéaire en kg : km ($D = 8,91$)	Résistance électrique linéaire maxima à 0° en ohms par km.	Ténacité totale en kg.
2,0	3,1415	28,00	6,42	185,000
2,1	3,4636	30,87	5,82	203 000
2,2	3,8013	33.88	5,33	223,500
2,3	4,1547	37,03	4,85	240,000
2,4	4,5238	40.32	4.46	265.000
2,5	4,9087	43,75	4,11	288,500
2.6	5.3093	47,32	3,80	312,000
2,7	5.7255	51,03	3.52	336 600
2,8	6,1575	54,88	3,28	362,000
2,9	6 6052	58,87	3.05	388,000
3,0	7.0685	63,00	2,85	415,500
3,25	8,2958	73.94	2,43	487,700
3,50	9,6211	85,75	2,09	560,000
3,75	11,0446	98,44	1,83	630,000
4,00	12,5664	112,00	1,54	720,000

Fil bi-métallique Martin-Ducamp. — Le fil est formé d'une âme d'acier recouverte d'une gaîne de cuivre pur.

Densité	8, 3.
Charge de rupture	75 à 80 kg par mm².
Conductibilité relative	60 % de celle du cuivre pur.
Résistivité à 0°	2, 67 microhms-cm.

Le fil de 1 millimètre de diamètre pèse 6,518 kg par kilomètre, et sa résistance est de 33,9 ohms pour la même longueur.

CABLES ET FILS ISOLÉS. — CABLES ARMÉS CONCENTRIQUES. — ISOLANTS DIVERS

Câbles isolés. — Un câble isolé est composé d'une âme métallique recouverte d'une ou plusieurs couches de matière isolante semblables ou dissemblables entre elles.

L'âme métallique est formée par un fil unique, un ou plusieurs torons.

L'application de la couche isolante se fait par des procédés différents suivant sa nature : s'il s'agit de gutta-percha, on tréfilera ensemble chaque conducteur préalablement enduit de *chatterton* et l'isolant ramolli par la chaleur : l'application préalable de chatterton est inutile avec la *kérite*.

Si la couche est de caoutchouc, le mode opératoire est tout à fait différent ; il présente deux variantes.

On peut enrouler en hélice autour du câble une bande de caoutchouc dont les bords se recouvrent, ou bien coucher le câble sur une bande de caoutchouc dont on soudera les lèvres par pression.

La couche isolante peut aussi être faite d'une enveloppe végétale, tressée ou enroulée autour du conducteur et ensuite imprégnée de matière isolante.

Notons en passant que certains câbles sont formés par la réunion de plusieurs câbles isolés, dont l'ensemble est recouvert d'une ou plusieurs couches de matière isolante.

Gutta-percha. — Cet isolant s'extrait du suc de l'*Isonandra-Gutta*, arbre que l'on rencontre en Malaisie, à

Madagascar, etc. On peut recueillir ce suc, soit en pratiquant des incisions dans l'écorce de l'arbre, soit en abattant l'arbre lui-même.

Aujourd'hui l'Europe consomme annuellement environ 1 million de kilogrammes de gutta-percha, représentant à peu près 4 600 000 francs ; de 1880 à 1885, elle en a consommé par an plus de 3 250 tonnes, représentant 12 à 13 millions de francs.

La gutta-percha est une gomme-résine renfermant de 2 à 6 % d'eau, 50 à 60 % de gutta pure et 35 à 45 % de résines étrangères, l'albane et la fluavile ; ces deux dernières sont solubles dans l'alcool et l'éther qui ne dissolvent pas la gutta ; celle ci ne se dissout que dans la benzine, le sulfure de carbone et le chloroforme.

La gutta a une densité de 0,98 ; elle se ramollit à 37° C, devient plastique à 50°, fond et se résinifie entre 100 et 120°.

Chauffée entre 100 et 110° dans une atmosphère neutre, elle dégage toute son eau.

Placée dans un milieu sec, elle se résinifie. Elle ne se conserve bien que dans l'eau.

La présence de l'eau dans la gutta a pour effet de diminuer sa résistivité et d'accélérer sa résinification à l'air. On peut en tolérer une proportion de 5 %.

Une gutta ordinaire contient	. . . .	50 %	de gutta	pure
— bonne —	. . . .	60 %	—	—
— très bonne —	. . . .	65 %	—	—

Purification de la Gutta. — Cette opération a pour but tout d'abord de débarrasser les *boules* ou *pains* arrivés du pays de production des matières étrangères qu'ils renferment : bois, feuilles, terre, pierres, etc. ; ces corps

étrangers y ont été souvent introduits pour frauder sur le poids de la marchandise.

Les pains de gutta sont tout d'abord débités en copeaux par l'action d'un hachoir formé d'un cylindre dont la surface est recouverte de lames de couteau.

On gratte les copeaux à la main, pour enlever les plus gros corps étrangers, puis on les ramollit dans un bain d'eau chaude. Les impuretés tombent au fond, tandis que la gutta surnage.

Les copeaux sont recueillis sur une pelle en toile métallique, puis travaillés à la râpe. Cette machine est formée de deux cylindres cannelés entraîneurs, qui forcent la gutta à se présenter devant des lames taillées en dents de scie et qui tournent à 100 tours par minute. La gutta est réduite en petits fragments qui tombent dans un bac d'eau froide où ils déposent encore une partie de leurs impuretés.

Ramollie de nouveau à l'eau chaude, elle est ensuite travaillée par des cylindres laveurs et filtrée à la presse hydraulique au travers d'une toile métallique.

L'épuration en est terminée, mais il reste à lui faire perdre son eau en la soumettant à l'action de deux machines respectivement désignées sous les noms de *sécheur* et de *masticateur*.

A sa sortie de ce dernier appareil elle est laminée en feuilles de 2 centimètres d'épaisseur.

MM. A. Grammont et Cie, de Pont de Chérui, purifient la gutta par le sulfure de carbone et la benzine.

Caoutchouc. — Le caoutchouc est aussi le produit d'un végétal. Il s'écoule, en même temps que le lait, quand on incise un certain arbre de la famille des Euphorbiacées.

Le Brésil est le pays producteur par excellence, et la province de Para fournit la qualité la plus réputée. Il a donné en 1887-1888-15.766.000 kilogrammes de caoutchouc.

Le suc laiteux présente la composition suivante :

Caoutchouc	32	pour cent
Eau	56	—
Albumine	2	—
Substance azotée soluble dans l'eau et l'alcool	7	—
Substance azotée soluble dans l'eau seulement	3	—

Le caoutchouc arrive du Brésil en *boules* formées de couches concentriques. Ces boules sont obtenues en trempant dans le suc un moule en forme de poire, en faisant sécher au feu le liquide adhérent et en recommençant jusqu'à ce qu'elles aient le diamètre voulu.

Le caoutchouc a pour densité 0,92. Il se ramollit à 75° et fond à 120. Il absorbe plus d'eau que la gutta.

Il est soluble dans les essences, la benzine et le sulfure de carbone.

Il se résinifie à la longue au contact de l'air.

Les qualités de la gutta-percha. — M. Lagarde conclut ainsi ses études sur les qualités de la gutta-percha ;

L'eau diminue le pouvoir isolant de la gutta-percha et facilite son oxydation.

Les résines, l'albane surtout, augmentent le pouvoir isolant, mais sont une cause de détérioration.

Une gutta se conserve d'autant mieux qu'elle contient moins d'eau et de résines. L'albane tend à faire fendiller la gutta couvrant un câble par un temps un peu froid. L'isolement électrique ne suffit pas pour déterminer la qualité d'une gutta ; il faut avoir recours à l'analyse.

On ignore si les guttas pures de diverses provenances ont les mêmes qualités électriques. Cela est probable, mais non encore établi.

Le tableau suivant résume les compositions de différentes guttas commerciales. Les quantités d'eau, de matières étrangères et d'albane doivent être considérées comme des maxima, au point de vue de la qualité.

Composition en pour cent des différentes guttas-perchas.

Nature des guttas-perchas	Eau	Impuretés	Résine totale	Fluavile	Albane	Gutta pure
Gutta extraite des feuilles de l'Isonandra (proc. Serrulas). . . .	0	0,8	16,	1,72	14,28	83
Gutta de très bonne qualité . . .	3	0,5	31,5	19,5	12	65
Gutta de bonne qualité	5	0,8	34,2	17,1	17,1	60
Gutta d'assez bonne qualité . . .	5	1	38	19,5	19,5	55

M. Lagarde n'a pu étudier la résistivité de la gutta percha extraite des feuilles de l'Isonandra, n'ayant pas eu à sa disposition un échantillon de longueur suffisante. Il explique le grand pouvoir isolant attribué à cette gutta par l'absence d'eau et de la grande quantité d'albane relativement à la fluavile. Ce manque d'eau doit rendre la gutta moins facilement oxydable et lui assurer une plus grande conservation.

Câbles isolés à la kérite. — Nous n'avons pas mentionné cet isolant dans le chapitre précédent, en raison de l'incertitude qui règne sur sa composition.

La couverture du câble s'opère comme suit. Le câble fait de fils étamés est enroulé sur un tambour, d'où il passe dans une cuve contenant la kérite en fusion.

Le recouvrement se fait comme avec la gutta-percha. La couche de kérite est ensuite vulcanisée.

Procédé Bruce Warren. — Le traitement que ce constructeur fait subir aux câbles isolés au caoutchouc a pour objet d'éviter les frais d'étamage du cuivre, et d'empêcher l'oxydation du caoutchouc.

Il consiste à soumettre la couche de caoutchouc à l'action successive d'une solution d'iode dans l'iodure de potassium et de chlore gazeux. Le brôme peut être substitué à l'iode.

Isolants divers. — Les prix élevés du caoutchouc et de la gutta-percha ont poussé les chercheurs à fabriquer dans le laboratoire une substance à bon marché et susceptible de les remplacer.

A vrai dire ce résultat n'est pas encore obtenu, mais comme quelques-uns de ces produits ont des qualités particulières qui les font employer dans l'industrie électrique, nous donnons ci-dessous la composition et la préparation des principaux d'entre eux.

Il va de soi que les formules de préparation sont données sous toutes réserves, les fabricants entourant leurs procédés de secrets.

Caoutchouc vulcanisé. — Cette variété de caoutchouc est une combinaison de caoutchouc et de soufre.

On l'obtient en chauffant du caoutchouc dont la masse est imprégnée de fleur de soufre.

Un procédé plus récent consiste à traiter à froid le caoutchouc par une dissolution de chlorure de soufre dans le sulfure de carbone.

Le caoutchouc vulcanisé renferme de 25 à 30 pour cent de soufre, il reste élastique aux basses températures.

Ébonite. — Dérivée du caoutchouc vulcanisé, elle s'obtient en soumettant plusieurs heures à la température de 130° à 140° un mélange de caoutchouc vulcanisé de noir de fumée et de magnésie calcinée.

Papier. — Le papier et le carton ont une résistance spécifique variable d'un échantillon à l'autre, mais néanmoins extrêmement grande, comme on peut en juger par les chiffres suivants dus à Uppenborn.

Pression en kilogrammes par centimètre carré	Carton ordinaire	Résistance spécifique, en millions de mégohms centimètre	
		Papier gris du commerce	Papier parchemin
0	4 850	3 100	30 500
1	2 430	2 700	3 770
2	2 430	2 500	2 830
5	1 580	1 600	1 940
10	1 054	1 320	1 350
20	467	800	880

Micanite. — Cette substance isolante inventée par MM. Jeffer et Dyer posséderait toutes les qualités du mica moulé sans en avoir les défauts.

Tandis que ce dernier formé d'un mélange de mica pulvérisé et de gomme laque, ou tout autre ciment, a l'inconvénient de se ramollir à la chaleur et de présenter des veines relativement conductrices, la micanite au contraire est inaltérable à la chaleur et exempte de veines conductrices.

Elle est formée de lames de mica très finement clivées, superposées et réunies par un ciment inaltérable. Elle se travaille au tour et à la lime et peut servir à faire des pièces de toutes formes.

Ozokérite. — C'est une cire minérale que l'on trouve en Moravie et dans l'Utah.

Elle renferme 14 °/₀ d'hydrogène et 86 °/₀ de carbone.

On l'emploie au lieu et place du goudron de Stockholm, pour imprégner les rubans qui seront enroulés sur des câbles.

Heylite. — Cette substance est obtenue en traitant à 400° un mélange d'huiles de lin, d'olive, de coton par l'acide azotique, puis par la craie.

Le produit après saponification est additionné de résine et de baume de Canada.

Elle imprègne bien les tissus, ne s'altère pas rapidement et fond à 450°.

Nigrite. — Après avoir distillé l'ozokérite pour les besoins de la parfumerie, on traite le brai par la chaux. Le produit est ensuite trituré avec du caoutchouc, et l'on obtient une masse noire présentant de bonnes qualités isolantes.

Wrayite. — Cette matière est un mélange de gomme laque, de caoutchouc, de gutta-percha en faible proportion, environ un dixième, et d'alun.

Elle n'attaque pas le cuivre et peut être appliquée soit par fusion, soit par soudure des bords d'une lame : elle possède une résistance électrique analogue à celle du caoutchouc.

L'eau de mer la détruit.

Caoutchouc artificiel. — On obtient un caoutchouc plus ou moins résistant en faisant dissoudre 4 parties de *nitrocellulose* avec 7 parties de *bromonitrotoluol* ; en faisant varier la proportion de nitrocellulose, on peut obtenir une matière douée de propriétés élastiques et

ressemblant beaucoup au caoutchouc et même à la gutta-percha. On peut aussi, suivant la *Revue de Chimie industrielle*, remplacer le bromonitrotoluol par le *nitrocumol* et ses homologues.

La diélectrine. — C'est un mélange de paraffine et de soufre, qui est bien préférable à l'un ou à l'autre de ces isolants : il est plus dur, moins fusible que le premier, moins cassant et moins hygrométrique aussi que le second. Grâce à un dispositif spécial employé par M. Chabaud, on parvient à mouler ce produit ; on l'obtient bien homogène, très dur, facile à travailler au tour ou à la lime ; aussi peut-on lui donner diverses formes.

M. Hurmuzescu en a fait des bagues, des supports, une bobine, des manches de plan d'épreuve, un électrophore où le disque métallique en aluminium porté par un manche en diélectrine repose sur un gâteau en diélectrine ; avec cet électrophore on obtient des étincelles de $0^m,02$ de long ; il reste chargé très longtemps et fonctionne même à l'humidité. L'auteur a présenté enfin des électroscopes où le support de la tige à laquelle sont attachées les feuilles d'or est un disque en diélectrine (la cage de l'électroscope est métallique pour éviter les charges par convection). La nouvelle substance, très inaltérable, comme le prouvent des échantillons parfaitement conservés depuis 1892, rendra de grands services pour les isolements surtout dans les endroits humides.

Substance isolante Jacksen. — Cette matière, composée de paraffine, de caoutchouc et de goudron, mélangés à une température convenable, jouit d'une grande ténacité et serait destinée par son inventeur, M. Jacksen de Londres, à remplacer la gutta-percha.

On la prépare de la manière suivante : 10 parties de

paraffine et une partie de goudron sont maintenues à une température de 200 à 250 degrés jusqu'à ce que les deux corps soient intimement mélangés. Cela fait, et dès que la température est descendue à 100 degrés, on introduit dans ce mélange deux parties de caoutchouc, on brasse le tout et on maintient la température jusqu'à ce qu'on obtienne une masse bien homogène.

On fait varier les proportions des divers corps entrant dans la composition de cet isolant suivant les conditions auxquelles il doit satisfaire.

Régénération des rebuts et déchets des tissus caoutchoutés. — Dans les fabriques américaines, on se sert de deux procédés qui sont à peu de chose près, les mêmes pour rendre la gomme susceptible d'être employée à nouveau.

L'un de ces procédés consiste à broyer les différents objets et les réduire en poudre la plus menue possible, à séparer par le tamisage les fibres textiles qui s'y trouvent mélangées. Le résidu est soumis à l'action de la vapeur d'eau à la pression de 6 atmosphères, puis on le passe entre deux cylindres pour en faire des bandes ou feuilles de peu d'épaisseur.

Dans le second système, on passe les objets de rebut entre deux cylindres cannelés pour les réduire en morceaux de 1 $(cm)^2$ environ, puis on carbonise le tissu végétal en faisant bouillir le tout avec de l'acide sulfurique dilué. On la lave à l'eau pure, puis avec une solution légèrement alcaline ; enfin l'on sèche entre deux cylindres.

Dans ces deux genres d'opération, il est à remarquer que l'action de la vapeur est la plus importante, puisque la gomme ne devient susceptible d'être travaillée

qu'après avoir été soumise à l'action de la vapeur d'eau.

L'élasticité du caoutchouc ainsi obtenu est suffisante pour permettre d'employer le produit, soit pour l'imperméabilisation des étoffes, soit pour enduire les câbles ou autres objets qui doivent être soumis à une longue immersion (1).

Paraffine. — On l'extrait des goudrons de pétrole ou de houille.

C'est une substance blanche d'un pouvoir isolant très élevé qui a le défaut de fondre à basse température.

Elle imprègne bien.

Chatterton. — D'un usage extrêmement répandu, cette composition a la propriété d'adhérer au cuivre et à la gutta-percha.

Elle est formée de :

Gutta-percha	3 parties
Résine	1 —
Goudron de Stockholm	1 —

Elle a même densité que la gutta-percha, mais sa capacité inductive est moindre.

Arcanson. — La formule suivante donne de bons résultats :

Arcanson	2,5 parties
Cire	1 —

On élève le point de fusion du mélange en forçant la teneur en cire.

Câble à isolement léger. — Ce genre de câble convient

(1) Pour plus amples détails, consulter le *Caoutchouc* et la *Gutta-Percha,* par Th. Seeligmann, Lamy et Falconnet. J. Fritsch, éditeur. 1896.

lorsque la ligne traverse des locaux secs, même très chauds (fig. 165).

L'isolement léger est formé d'une couche de ruban de

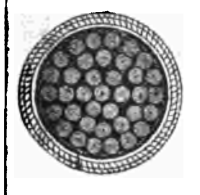
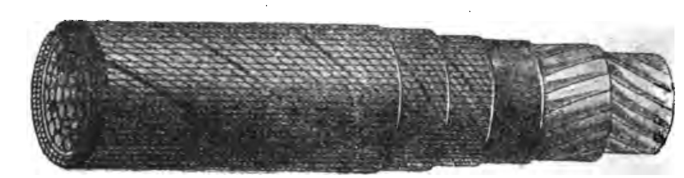



Fig. 165. — Câble à isolement léger.




Fig. 166. — Câble à isolement fort.




Fig. 167. — Câble à isolement très fort.

toile bitumée et d'une couche de tresse également bitumée.

Câble à isolement fort. — Si les locaux à traverser sont humides, le câble doit être davantage protégé : on l'entoure de couches superposées de caoutchouc vulcanisé, de ruban caoutchouté et de chatterton, composition dont j'indiquerai plus loin la nature (fig 166).

Câble à isolement très fort. — Quand l'humidité des locaux est encore plus grande on a recours à l'isolement très fort qui se compose de couches superposées de caoutchouc naturel, de caoutchouc vulcanisé, de ruban caoutchouté, de tresse bitumée et de chatterton (fig. 167).

CABLES ARMÉS

Il y a souvent lieu de protéger la couche isolante soit contre des chocs mécaniques, soit contre l'action de vapeurs : les câbles armés ont été construits dans ce but que l'on réalise en entourant le câble d'une gaine de plomb ou d'acier.

Câbles sous plomb. — Le plomb, par sa malléabilité et son prix peu élevé présente de grands avantages ; le câble armé au plomb ne perd rien de sa souplesse.

Il faut noter que l'enveloppe de plomb est fortement attaquée par l'acide acétique qui se produit par l'action de la créosote sur les moulures de bois qu'elle imprègne. Un contact de deux années peut amener une corrosion du plomb de 3 millimètres d'épaisseur.

L'application de l'armure de plomb se fait mécaniquement.

Le câble et une lame de plomb sont enroulés chacun sur un tambour et conduits ensemble à une filière qui courbe en *V* la lame sur le câble. L'ensemble passe ensuite entre deux galets à gorge qui rabattent l'un sur l'autre les lèvres de la lame ; celles-ci sont suiffées puis soudées ensemble par une flamme de chalumeau. Le câble passe ensuite dans une filière qui étire légèrement le plomb et assure le parfait contact du câble et de son enveloppe.

Câbles sous fer. — Par analogie nous désignerons ainsi les câbles isolés enfilés dans un tube de fer.

Le manque de flexibilité de l'ensemble s'oppose à leur emploi courant.

Câble sous spirale d'acier. — Ce système d'armure préconisé par Siemens est formé par une bande d'acier enroulée en spirale autour du câble.

Cette disposition a sur la précédente l'avantage de conserver sa flexibilité au câble.

Câbles sous fils d'acier. — Très employé dans la construction des câbles pour télégraphie sous-marine, ce dispositif a reçu d'assez nombreuses applications dans l'établissement des canalisations de lumière électrique.

Le câble est recouvert d'une couche de fils d'acier juxtaposés et enroulés en hélice.

Câble Siemens. — Le conducteur est formé du nombre de brins nécessaire, et il est recouvert de deux *guipages* enroulés en sens inverse et imprégnés d'une composition bitumineuse tenue secrète.

Ce câble est à double armure : un tube de plomb et deux rubans en acier superposés et enroulés en hélice.

Une enveloppe de chanvre goudronné recouvre le tout.

Câbles Brooks. — Employé en Amérique, ce câble présente cette particularité qu'il est recouvert de son isolant au moment de la pose.

On dispose d'abord dans la tranchée une série de tubes de fer réunis bout à bout, et préalablement enduits intérieurement d'huile lourde de résine dite *huile de Londres*, qui a la consistance de la mélasse. On a passé successivement dans chaque tube l'extrémité d'un fil d'acier de 5 millimètres qui servira à *tirer* le câble.

La bobine de câble est chauffée sur place à 120° dans un bain d'huile de Londres. Quand il ne se dégage plus de bulles, indice du départ de l'humidité du guipage de coton qui recouvre le câble, on attache l'extrémité de celui-ci au fil d'acier que l'on enroule sur un treuil à l'autre extrémité de la tranchée.

Le câble se trouve ainsi introduit dans les tubes de fer dont il reste isolé par la couche d'huile de Londres qu'il entraîne.

Les boites de jonction sont ensuite remplies d'huile chaude.

Câble Fortin Hermann. — Le conducteur est enfilé sur une série de perles en bois dur imprégné de paraffine. Le tout est enfermé dans une enveloppe de plomb.

Il faut, dans tous les cas, se prémunir contre le danger d'étincelles par suite de rupture des câbles conducteurs, de contact fortuit de fils dénudés ou de dérivations.

Câbles concentriques. — Généralement les fils d'aller et de retour sont distincts, mais dans certains cas et notamment s'il s'agit de courants alternatifs de fréquence élevée on préfère employer des câbles concentriques qui produisent des effets moindres d'induction que deux conducteurs distincts et opposent une résistance moins élevée au passage du courant.

Un conducteur concentrique est généralement formé de quatre couches distinctes : au centre, l'un des conducteurs formé d'un ou plusieurs brins, une enveloppe isolante, une couronne concentrique à l'axe du câble formée d'un certain nombre de brins, et enfin une enveloppe extérieure isolante.

La section de la couronne doit être, bien entendu, égale à celle du faisceau central.

Les différents modèles de câbles concentriques diffèrent entre eux par la composition des couches isolantes, par leur nombre, et l'armure métallique qui presque toujours les recouvre.

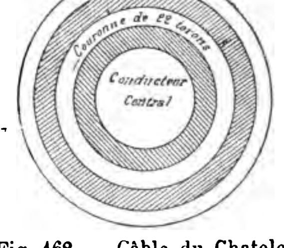


Fig. 168. — Câble du Chatelet.

Voici la description de quelques types de câbles de cette catégorie.

Câble du Chatelet. — Le conducteur central comprend 59 brins de 3 millimètres. La première enveloppe isolante est une gaine de caoutchouc de 5 millimètres d'épaisseur. La couronne est formée de 22 torons comprenant chacun sept brins de 1,7 millimètres (fig. 168).

Une couche de caoutchouc de 5 millimètres d'épaisseur recouverte d'une enveloppe épaisse en jùte goudronné enveloppe le tout.

Câble des Halles Centrales. — Le conducteur central comprend 19 brins étamés de 2 millimètres. Il est recouvert d'une couche de caoutchouc Para, de trois couches de caoutchouc blanc et d'une couche de caoutchouc noir. La couronne comprend 24 fils étamés de 1,8 millimètre ; elle est isolée par une couche de caoutchouc noir, deux rubans caoutchoutés, une couche de chanvre imprégné de résine et deux rubans de coton.

Le câble est armé d'un tube de plomb de 2,5 millimètres d'épaisseur recouvert de filin bitumé.

Câble de l'Élysée. — Le conducteur central est formé de sept brins ; il est recouvert d'une couche de caout-

chouc. La couronne comprend 40 brins. Elle est isolée par une couche de caoutchouc et un ruban caoutchouté (fig. 169).

Le câble est armé par une gaine en fils d'acier protégée par une enveloppe de chanvre imprégnée de matière isolante.

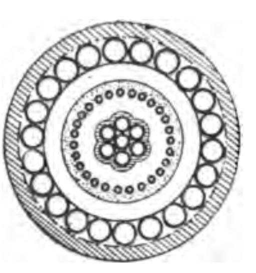


Fig. 169. — Câble de l'Élysée.

Câble Jaspar pour mines grisouteuses. — Dans les mines, les ruptures proviennent généralement de chutes de pierres ou de boisages sur le câble.

Le conducteur pour mines grisouteuses devrait répondre aux conditions suivantes :

A. Le fil auxiliaire doit se rompre le premier ;

B. Cette rupture doit s'opérer à l'abri de l'atmosphère ambiante :

C. Le câble doit indiquer les détériorations qui lui surviennent, au moins celles de nature à nuire aux appareils interrupteurs ;

D. La réparation du câble doit être facile, rapide ;

E. Enfin le câble doit être relativement peu coûteux.

Ces conditions paraissent remplies par le système Nolet, breveté par la Société Cockerill et M. Jaspar.

Le conducteur auxiliaire central est un simple fil isolé, dont le diamètre est indépendant de l'importance du câble proprement dit qui l'entoure et qui est composé de fils à peu près jointifs. Extérieurement, ce câble est protégé par une armature en fil d'acier.

La canalisation,composée, comme à l'ordinaire, d'un fil positif et d'un fil négatif, est sectionnée, la longueur des sections étant déterminée par les conditions locales

et le degré de sécurité exigé. Supposons une traversée de mauvais terrains, dans laquelle le câble est supporté de 15 en 15 mètres. Les sections sont accouplées les unes aux autres à l'aide de manchons. On dispose les manchons d'accouplement de manière à en rencontrer un entre chaque support. Ce manchon est double ; le petit manchon intérieur sert à l'accouplement du fil fin auxiliaire, tandis que le manchon extérieur réunit les sections du câble proprement dit. Le manchon est de plus entouré d'un tuyau de caoutchouc de résistance appropriée et dont les extrémités sont solidement liées au câble. Si l'on exerce sur le câble un effort assez considérable pour faire glisser le manchon, la première partie qui se découplera sera le fil fin, car quelques millimètres de course suffisent pour en séparer le bout du petit manchon intérieur. Si l'effort produit un plus grand déplacement, on arrivera finalement à découpler totalement le manchon ; mais cela bien après, car le manchon extérieur a une course considérablement plus grande que celle du manchon intérieur.

Nous allons voir maintenant quel parti on peut tirer d'une canalisation ainsi constituée. Considérons une canalisation quelconque composée de ses deux câbles, le positif et le négatif; cette canalisation est sectionnée à l'aide de manchons. A l'origine de cette canalisation, on place deux électro-aimants ; ces deux électros, quand ils sont traversés par un courant, ferment les circuits des deux câbles ; ce sont, en fait, des commutateurs. Commençant par le câble positif, une dérivation est prise à l'origine de ce câble, passe dans l'électro, puis dans un petit relais dont on verra le rôle plus loin, de là le fil est relié au fil secondaire du pôle po-

sitif, puis, enfin, à l'origine du câble positif, le fil auxiliaire traverse l'électro et le circuit se ferme sur le câble négatif.

A l'extrémité de la canalisation, le fil auxiliaire est relié par un petit manchon qui renferme un fil fusible ; nous en verrons plus loin le rôle. Le milieu du fil auxiliaire est indiqué comme mis à la terre ; nous discuterons également plus loin ce que cette disposition permet de réaliser.

Tout ceci posé, remarquons que le fil auxiliaire de chaque câble est parcouru par un courant de polarité contraire. En fermant maintenant à la main les deux électro-commutateurs, le courant les traversera de suite et les tiendra en place, la canalisation pourra donc alimenter les lampes ou les appareils du circuit.

Supposons maintenant qu'un effort accidentel soit exercé sur le câble, effort qui tende à le rompre, la section sur laquelle cet effort s'exercera se découplera immédiatement, et comme le fil auxiliaire sera le premier découplé, le courant sera coupé dans le circuit des électros, avant que le manchon ne soit lui-même découplé. Mais dès que le circuit des électros est rompu, les commutateurs se trouvent relâchés et le circuit des deux câbles coupé instantanément à l'origine ; si donc le manchon vient à se découpler complètement, aucune étincelle n'est possible au moment de la rupture, puisque tout courant est interrompu. Si l'accident n'a pas mis le manchon hors de service, il suffira de le réaccoupler et de réparer l'enveloppe en caoutchouc ; quant au courant, c'est de nouveau à la main qu'il faudra le rétablir en abaissant les deux armatures des électros-commutateurs.

Le câble peut encore souffrir d'autre manière : on

pourrait par exemple, l'écraser ou même le couper et par là provoquer des étincelles ; la canalisation n'a rien à craindre, même dans ces cas extrêmes.

L'écrasement du câble ou tout autre accident du même genre aura naturellement pour effet de produire un court-circuit entre le fil auxiliaire et le câble. Supposons que ce court circuit se fasse à un point rapproché, par exemple, il est aisé de voir que ce court-circuit aura pour effet de faire passer tout le courant dans l'électro, le circuit se formant, tandis que l'électro ne sera plus parcouru par aucun courant. Le commutateur de l'électro se trouvera donc relâché et le courant coupé aux deux pôles instantanément. Si le court-circuit s'était produit sur le câble négatif, le résultat aurait été naturellement le même, mais c'est l'électro qui aurait alors coupé le premier le courant.

On peut encore admettre que, sur les deux câbles un court-circuit se produise mathématiquement au même moment ; si peu probable que cela soit, la canalisation est encore protégée. Chacun des électros sera parcouru par un courant environ double de celui qui les parcourt normalement ; au lieu de déclencher, ils retiendront, au contraire, plus énergiquement leurs armatures commutateurs.

Pour obvier à cet inconvénient, le petit relais entre en jeu. Quand tout est normal, celui-ci maintient fermé le circuit secondaire : quand, au contraire, le magnétisme de sa bobine augmente, il attire son armature et rompt le courant du fil auxiliaire. Nous avons vu plus haut que le courant dans les électros était le double du courant normal, quand il y a court-circuit sur les deux câbles ; il en est de même naturellement dans la bobine

du relais, celui-ci attirera donc son armature et de nouveau le courant se trouvera coupé aux deux pôles de la canalisation. La partie du fil secondaire est de plus protégée par le fil fusible dont nous avons parlé au début.

Il nous reste encore à signaler une propriété curieuse de cette canalisation. Supposons que l'on mette à la terre le fil auxiliaire, les deux électros étant en série sur une dérivation, on les place alors dans le cas des indicateurs de terre bien connus ; si donc une fuite se produisait sur un câble, l'électro correspondant lâcherait son armature et le courant serait interrompu.

Telles sont les qualités que possède la canalisation de sûreté Cockerill-Jaspar, qualités qui la rendent éminemment propre à l'emploi dans tous les milieux explosibles où les étincelles sont à redouter.

Il est à peine besoin de dire que, dans le cas où les électro-déclancheurs et le petit relais doivent être installés dans la mine, à l'origine d'un branchement, ils sont placés dans une boîte métallique robuste hermétiquement close et sans communication avec l'atmosphère ambiante. La clef de manœuvre des armatures des électro-déclancheurs est de modèle spécial et confiée à un surveillant. La disposition du pont de contact et de l'armature des électros est telle qu'une forte pression s'exerce sur le pont et assure la résistance du contact malgré de violents chocs.

On observera que la disposition en sections raccordées par manchons à frottement a pour effet de produire la rupture en un point presque toujours distant de l'éboulement ; or, les éboulements sont souvent accompagnés de gaz et il importe d'en éloigner le point où pourrait jaillir une étincelle de rupture du courant.

Cette disposition permet encore la réparation rapide des sections endommagées, par la substitution de sections à peu près de même longueur. Elle offre de grandes facilités pour la prise de courant pour des lampes, ainsi que pour le prolongement, en peu de temps, de la ligne vers un point plus éloigné. Enfin, on peut confectionner des branchements à l'aide des boîtes intercalées en un instant sur un manchon quelconque.

Joints vulcanisés des câbles électriques. — L'usine française de la « The India Rubber Gutta-Percha and Telegraph Works C° » a publié des renseignements peu connus sur la confection des joints vulcanisés, dont la pratique a été inaugurée par cette Compagnie, et qui permettent d'obtenir, sur la canalisation une fois faite, le même isolement que sur le câble essayé à l'usine. Ces joints peuvent présenter des avantages sur les boîtes de jonction, qui recueillent de l'humidité et se prêtent aux pertes du courant.

Préparation des extrémités et jonction métallique. — La tresse extérieure est d'abord enlevée, les rubans déroulés, et le conducteur dénudé sur une longueur d'au moins 8 ou 10 diamètres, qui, pour des fils fins, n'est pas inférieure à 5 *cm*. Le caoutchouc des câbles vulcanisés ou similaires est coupé à angle droit, sans entailler le cuivre ; s'il s'agit de câbles au caoutchouc pur, celui-ci est déroulé, mais non coupé.

Pour faire les joints, on n'emploie que de la résine, soit brute, soit sous forme d'une pâte légère obtenue en la dissolvant en poudre dans l'esprit de vin. Les pièces à souder sont maintenues toujours propres, en les plongeant dans une solution saturée de sel ammoniac. Le conducteur en cuivre est également maintenu propre, et

lorsque la soudure est faite, on lime les parties irrégulières, de façon à présenter à l'isolant une surface bien lisse.

Câble à un seul fil. — Les extrémités en cuivre sont limées en biseau allongé et les deux bouts sont appliqués l'un sur l'autre de façon à présenter une grande surface de contact. Les biseaux sont alors soigneusement soudés et entourés par un fil fin, le tout soudé à nouveau est nettoyé avec une lime ou une toile d'émeri. Le diamètre final ne doit pas excéder sensiblement le diamètre primitif.

Câble formé d'un toron de 7 brins. — Tout le toron est d'abord soudé sur lui-même de façon à former un solide qui est alors coupé en biseau et soudé à nouveau comme précédemment.

Câble formé d'un toron de 19 brins. — Après avoir dénudé le conducteur sur une longueur convenable, on enroule un petit fil autour des extrémités près du caoutchouc, puis on sépare les 12 fils extérieurs de leur toron pour les relever ensuite en arrière. Le toron central de 7 fils est alors soudé et joint comme un conducteur solide. Pour réunir les 12 fils par-dessus, on coupe alternativement les fils, court et long, et on marie les 2 séries de 12, c'est-à-dire que le long fil d'un des câbles est joint au fil court de l'autre, tout autour du toron central, de sorte que la moitié des jonctions se trouve d'un côté et l'autre moitié de l'autre côté du centre du raccord. Le joint de ces fils simples n'a pas besoin d'être fait en biseau, mais seulement par la butée du fil court contre le fil long, à l'endroit où on fait la soudure. Une étroite ligature de fil fin est placée aux deux extrémités du joint, puis elle est soudée ; le tout est alors adouci à la lime.

Câble composé d'un toron de 57 fils. — Si la flexibilité est nécessaire, on suit la même méthode, en mariant en outre de la même manière les 18 fils situés sur le toron de 19 fils.

Si la flexibilité n'est pas essentielle, le toron de 19 fils peut être taillé en biseau et joint comme le toron de 7 fils ; les 18 fils restants sont seulement mariés entre eux. On procède de la même manière pour un câble composé d'un toron de 61 fils.

Joints de conducteurs en T. — Jonction d'un fil simple avec un autre fil simple. — Le plus petit fil est taillé en biseau et appliqué le long de la surface de l'autre fil puis serré par un fil fin enroulé autour, soudé et adouci ; mais la ligature ne va pas tout à fait jusqu'au point où le petit fil est courbé.

Jonction d'un fil simple à un toron. — On nettoie les surfaces, on enroule en spirale l'extrémité du fil simple autour du toron, mais on le laisse dans le sens du toron au point de jonction, et on fait une ligature sur cette partie rectiligne avant de souder le tout.

Jonction d'un toron de 7 fils à un câble plus gros. — Le toronnage des 7 fils est défait et, après avoir nettoyé les fils séparément, on les enroule autour du gros câble, trois étant enroulés parallèlement dans une direction, et quatre dans la direction opposée et sur l'autre branche du T. Une légère ligature de fil de cuivre fin est ensuite faite à chaque extrémité, et le tout est soigneusement soudé.

Grands joints en T. — Tous les fils de chaque câble sont nettoyés, puis soudés ensemble. On taille alors en biseau le plus petit câble et on ménage à la lime dans le gros câble une cavité à la profondeur d'une moitié de

diamètre ; les deux parties sont ajustées et soudées ensemble, puis entourées par un fil et soudées à nouveau.

Isolement des joints. — Joints au caoutchouc vulcanisé. — Lorsque le joint du conducteur est terminé, le caoutchouc est taillé obliquement de façon à former tout autour du conducteur un biseau aussi long que possible, en tenant compte de l'épaisseur de la couche de caoutchouc. Le conducteur de cuivre et les extrémités du caoutchouc sont alors frottés avec de la benzine pure et chauffés légèrement avec une lampe à alcool. Le conducteur et les bords du caoutchouc sont ensuite recouverts par une bande de caoutchouc pur tendue aussi fortement que possible en une ou deux couches suivant les dimensions.

On étend une solution spéciale de caoutchouc par dessus le caoutchouc pur, appliquée de façon à exclure l'air le plus possible ; on doit ensuite la laisser complètement sécher. Quand la solution est suffisamment sèche et n'adhère plus aux doigts, une bande de caoutchouc spécial est enroulée en spirale de façon à former un revêtement uniforme par dessus la première enveloppe de caoutchouc pur. Il faut avoir soin de laisser aussi peu d'air que possible entre les couches, en tendant constamment et fortement.

On applique cet enroulement de caoutchouc en couches superposées jusqu'à ce qu'on atteigne le diamètre de l'isolant primitif, et par dessus le tout on enroule une couche de ruban caoutchouté de façon que le diamètre total du joint ainsi fait excède légèrement le diamètre de l'isolation primitive. Il s'agit maintenant de vulcaniser le joint. Dans ce but, on le recouvre d'une enveloppe de toile cretonne coupée à la largeur du joint, en-

roulée fortement autour du câble et maintenue par un fort ruban de coton enroulé et tendu fortement en spirale ; cette enveloppe remplit l'office d'un moule maintenant en place toutes les parties du joint pendant la cuisson.

Le joint est placé à l'intérieur d'une boîte en fonte de forme particulière et fermée par un couvercle boulonné. Afin de garantir l'isolant appliqué précédemment et pour que la fermeture soit étanche, on enroule du ruban autour du câble aux deux points correspondant à l'entrée et à la sortie de la boîte, de façon à obtenir une fermeture hermétique. On verse alors par une ouverture située à la partie supérieure de la boîte, une composition sulfureuse, fondue préalablement dans un vase convenable. Après avoir coulé le liquide de façon à entourer complètement le joint, on plonge un thermomètre par l'ouverture et on maintient la température aussi constante que possible entre 145 et 150° C, en chauffant la boîte avec des lampes à alcool. Après avoir entretenu cette température pendant environ une demi-heure, le souffre fondu est coulé hors de la boîte et le couvercle enlevé ; on enlève le joint de la boîte, on le débarrasse des rubans et on voit qu'il est vulcanisé.

On peut essayer grossièrement le degré de vulcanisation obtenu en rayant le caoutchouc avec l'ongle une fois qu'il est refroidi. Si la marque de l'ongle reste empreinte ou si le caoutchouc est trop dur, le joint est mauvais et doit être coupé et refait. Si cet essai montre que la vulcanisation est bonne, on achève le joint en enroulant par dessus le tout des rubans qui viennent recouvrir la tresse de 5 *cm* environ de chaque côté et les enduisant ensuite de vernis à la gomme-laque.

Quelques précautions sont à prendre pendant l'opération. Les mains de l'opérateur qui touche le caoutchouc doivent être sèches et parfaitement propres. On ne doit se servir de la dissolution que par petite quantité : il faut laisser à la benzine le temps de s'évaporer avant d'appliquer une nouvelle couche ; elle doit d'ailleurs être de première qualité de façon à s'évaporer rapidement et sans laisser de résidu appréciable. Il faut veiller à ce que le caoutchouc que l'on applique soit en contact immédiat avec celui des bouts du câble et qu'il ne s'interpose ni rubans ni matières étrangères qui seraient une entrée pour l'humidité. Si l'on n'a pas maintenu tout en parfait état de propreté et si l'air n'a pas été complètement expulsé par un enroulement soigneusement serré, on est certain d'avoir un joint boursouflé, même si le caoutchouc a été convenablement vulcanisé. C'est pourquoi il faut donner la plus grande attention à ces détails.

Si, pendant la vulcanisation, la température tombait au-dessous de 145°, on devrait maintenir la chauffe pendant un temps plus long ; par exemple si la température est de 140°, la cuisson devra durer trois quarts d'heure au lieu de 30 minutes ; mais il est important de maintenir autant que possible la température dans les limites de 145 à 150°.

Si le ruban de caoutchouc pur est dur et sec, on doit le chauffer légèrement avant de s'en servir ; si le ruban caoutchouté est sale ou trop dur, on l'adoucit en le frottant avec de la benzine.

FILS

La dénomination de *fils* est réservée aux conducteurs ayant au plus 3,5 à 4 millimètres de diamètre.

Les fils s'emploient soit *nus* soit *isolés*.

Nous n'insisterons pas sur les premiers ; les fils isolés sont fabriqués par les mêmes procédés que les câbles, et recouverts d'une enveloppe faite d'une couche de caoutchouc vulcanisé, d'une tresse et d'un enduit, si la tension du courant ne doit pas dépasser 100 volts ; les fils destinés à canaliser un courant à haute tension pourront être recouverts de 2 couches de caoutchouc naturel, 2 couches de caoutchouc vulcanisé, 2 rubans caoutchoutés, d'une tresse et d'un enduit.

Les fils sont destinés à distribuer le courant aux récepteurs, soit sur la voie publique, soit dans l'intérieur des habitations. Ils seront branchés sur les conducteurs principaux directement ou par l'intermédiaire de *prises de courant*, et conduits aux récepteurs soit sous *moulures* soit supportés par des *clous spéciaux* dont la description et le mode d'emploi seront décrits ultérieurement.

Les *points de jonction* des fils entre eux peuvent être recouverts d'une couche protectrice de ruban chattertonné ou caoutchouté, et même de caoutchouc naturel ou vulcanisé.

Deux fils isolés peuvent être réunis sous la même enveloppe extérieure : on obtient ainsi les fils doubles très employés dans l'intérieur des habitations.

On donne aujourd'hui, pour les distributions intérieures, la préférence aux fils dits *Salamandre* dont l'enveloppe isolante est incombustible.

Le fil salamandre. — Ainsi que son nom l'indique, l'enveloppe isolante du fil *salamandre* ne peut prendre feu ni enflammer les moulures ou autres matières combustibles avec lesquelles elle se trouve en contact.

D'une façon générale, le fil salamandre est un fil ordinaire recouvert des enveloppes isolantes habituelles, entourées elles-mêmes de la *couche protectrice spéciale.*

Les brevets français de cette invention qui nous vient d'Amérique sont exploités par la Société Industrielle des Téléphones, qui entoure du plus grand secret la préparation de l'enveloppe *salamandre.*

L'emploi du nouveau fil est indiqué pour les installations intérieures, et afin que chacun puisse juger de son efficacité, nous résumerons ci-dessous une série d'essais officiels qui ont eu lieu dernièrement.

L'installation comprenait une dynamo à courant continu de 250 ampères et un rhéostat en série sur les divers échantillons à essayer permettait de graduer l'intensité du courant de 0 à 200 ampères.

Les fils soumis à l'essai comparatif avaient tous une section uniforme de 0,64 millimètres carrés, et étaient recouverts les uns de caoutchouc sous tresse, les autres de caoutchouc sous plomb. Le fil salamandre portait une couche de caoutchouc et une couche de la matière spéciale.

Les trois échantillons étaient placés en série sur une planchette.

Dès 50 ampères, le caoutchouc du fil sous tresse se déroulait et se fondait ; à 75 ampères le câble sous plomb a été mis hors d'usage.

A 100 ampères ces deux fils prennent feu, le cuivre étant porté au rouge sur tout le circuit,

Le fil salamandre après une minute du régime de 100 ampères avait sa gaine extérieure intacte.

— Les deux fils sont montés en dérivation sur les bornes du rhéostat.

Sous une intensité de 110 ampères, le fil sous tresse prend feu presque instantanément, tandis que le fil salamandre est à peine tiède après 2 minutes d'expériences.

Un courant de 150 ampères échauffe un fil sous plomb au point qu'après trois minutes d'expérience le plomb coule, tandis que le fil salamandre résiste et ne présente extérieurement rien d'anormal.

Les mêmes essais ont été repris, mais cette fois les fils étaient sous des moulures de bois.

Il faut un courant de 200 ampères pendant 20 secondes, pour que le fil sous plomb produise le même résultat.

Le fil salamandre supporte un courant de 100 ampères pendant 30 secondes sans enflammer la moulure et présenter une altération.

INFLUENCE DE LA COUVERTURE SUR LE POIDS ET LE DIAMÈTRE DES FILS. — Généralement les fils employés dans la construction des appareils électriques sont recouverts d'une enveloppe isolante coton ou soie. Il en résulte une augmentation de poids et de diamètre qu'il est souvent utile de connaître.

La couverture de coton augmente, pour les fils de moins de 0,1 millimètre de diamètre, le poids de 200 gr. par kg ; pour les fils de 0,5 millimètre de 120 grammes ; pour ceux de 1 millimètre de 100 grammes, et pour ceux de 6 millimètres de 25 grammes.

Voici du reste les résultats obtenus par Culley :

Diamètre du fil nu	Nombre de mètres par kilogramme nu	Poids de la soie en grammes
1,6	57	34
1	140	51
0,66	323	68
0,35	1 140	102
0,22	3 000	136
0,18	4 500	187
0,13	8 800	187

Quand il s'agit d'une couverture de coton, le diamètre du fil d est relié à l'épaisseur de la couche isolante $2\ d'$ par la relation :

$$2\ d' = 0{,}43 + 0{,}07\ d$$

Le tableau suivant qui se rapporte aux fils employés pour le bobinage des dynamos vérifie bien l'exactitude suffisamment approchée de cette formule empirique :

Diamètre du fil nu d mm	Diamètre du fil couvert $d + 2d'$ mm	Épaisseur total de la couverture $2d'$ mm
1	1,5	0,5
2	2,6	0.6
3	3,6	0,6
4	4,7	0.7
5	5,8	0,8
6	6,9	0,9
7	7,9	0,9
8	9	1
9	10,1	1,1
10	11,1	1,1

Épaisseur de l'isolant. — L'épaisseur de la couche isolante varie suivant le voltage du courant à canaliser,

toutes autres conditions restant les mêmes. On adopte généralement l'échelle suivante :

Voltage du courant	Épaisseur de l'isolant en millimètres
500 volts	1 millimètre
1 000 —	1,05 —
1 500 —	2 —
2 000 —	2,05 —
2 500 —	3 —
5 000 —	5 —
10 000 —	10 —

CHAPITRE XIII

CANALISATION AÉRIENNE — ISOLATEURS ET CONSOLES — POTEAUX

INTRODUCTION

L'emploi de fils aériens présente de grands avantages tant au point de vue des frais de premier établissement qu'au point de vue des facilités de pose, de réparation et de montage des dérivations d'abonnés.

Une ligne aérienne comprend deux parties distinctes : la ligne elle-même et ses supports.

Nous décrirons tout d'abord ces derniers et leur mise en place, puis aborderons la pose de la ligne sur les supports.

Les supports comprennent en général trois parties distinctes :

L'Isolateur qui reçoit directement le conducteur, la Console qui relie l'Isolateur au Support principal, et enfin ce dernier qui peut être un poteau, un mur.

Isolateurs. *Matière première.* — Differentes matières ont été essayées pour la fabrication des isolateurs, mais de toutes, celle qui a reçu la préférence est la porcelaine vernissée.

L'isolateur doit en effet satisfaire aux conditions suivantes :

Il ne doit pas condenser l'humidité à sa surface.

Les gouttes d'eau de pluie doivent se diviser en gout-

telettes isolées les unes des autres et ne pas former une nappe d'eau continue.

L'évaporation de l'eau doit se faire facilement.

L'isolateur ne doit pas, autant que possible, retenir les poussières.

Enfin, et ceci n'est qu'une question de forme, son nettoyage doit être facile.

Le verre, plus économique que la porcelaine, a été abandonné parce que s'il est poli il condense l'humidité à sa surface, et s'il est dépoli, il retient énergiquement les poussières.

L'ébonite a le défaut de sécher très lentement quand elle a été mouillée, de condenser l'humidité en une nappe continue et enfin de prendre sous l'influence de l'action de l'air une surface rugueuse.

La porcelaine vernissée au contraire sèche rapidement, ne retient pas les poussières et ne s'altère pas à l'air.

Types divers d'isolateurs. — Les isolateurs se divisent en deux catégories suivant leur résistance d'isolement.

A — Les Isolateurs pour courants à basse tension.

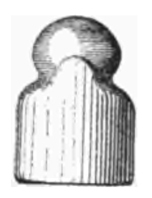
B — — — — — — haute —

Première catégorie. — Les formes les plus diverses ont été proposées sans que l'une ou l'autre présente des avantages particuliers : nous ne décrirons que les types employés couramment.

Isolateur a simple cloche. — *Type à oreilles*. — Il a la forme d'un cylindre creux surmonté d'une tête centrale évidée et de deux ergots latéraux (fig. 170).

Le conducteur se place entre la tête et l'un des ergots.

Pour éviter que les chocs ou les balancements ne fassent sortir le conducteur de l'encoche, on fixe ce dernier par un fil fin qui prend le câble et la tête de l'isolateur, et se loge dans l'évidement de la tête.



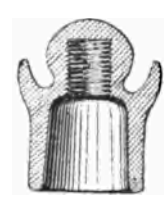
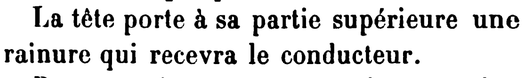


Fig. 170. — Isolateur à oreilles.

La tête de l'isolateur est faite creuse pour recevoir le support qui la fixera au poteau.

Type à gorge supérieure. — La disposition intérieure est la même que précédemment.



La tête porte à sa partie supérieure une rainure qui recevra le conducteur.

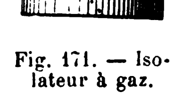


Fig. 171. — Isolateur à gaz.

Dans certains types cette rainure est infléchie à ses deux extrémités pour épouser la courbe du conducteur.

Isolateurs blindés. — Cette disposition est adoptée pour protéger la cloche de porcelaine contre les chocs.

L'isolateur porte une tête très allongée filetée extérieurement et munie à l'intérieur d'une série de gorges profondes disposées en hélice. On le recouvre d'une enveloppe métallique qui vient se visser sur sa tête et porte soit des oreilles, soit une rainure pour recevoir le conducteur.

Isolateur a double cloche. — Cette nouvelle disposition a pour effet d'atténuer les pertes par le support de l'isolateur soit du fait de l'humidité, soit de celui de poussières déposées par le vent.

Les isolateurs à double cloche pourront être à oreilles, à gorge ; ils ne diffèrent de ceux à simple cloche que par leur conformation intérieure.

La cloche est formée de deux enveloppes cylindriques, concentriques, en porcelaine l'une et l'autre.

La tige du support est intérieure à l'enveloppe du plus petit diamètre.

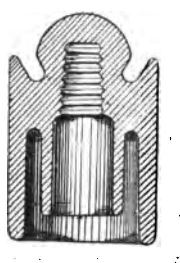
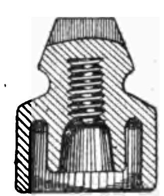



Fig. 172.

Toutes autres conditions égales, un isolateur à double cloche présente un isolement deux fois plus élevé que celui à simple cloche.

On conçoit sans peine que l'humidité ou la pluie condensée extérieurement ait plus de difficulté à monter *deux fois* le long des parois internes pour atteindre le support.

Poulies en porcelaine à gorge. — Cet isolateur est employé pour supporter soit des fils soit des câbles de fort diamètre.

Il est formé d'un cylindre en porcelaine muni d'une gorge circulaire perpendiculaire à son axe : cette gorge est destinée à recevoir le conducteur (fig. 173).

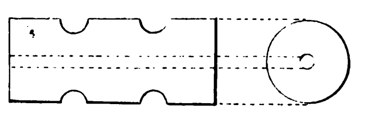


Fig. 173. — Poulie à gorge.

S'il s'agit seulement de supporter un câble, l'isolateur sera fixé à l'axe horizontal.

Si l'on veut l'employer comme arrêt pour donner au cable une direction nouvelle, on le fixera de façon que le plan de la rainure soit dans le plan formé par les deux bouts du câble.

Isolateur à oreille pour changement de direction. —

Si le conducteur est d'un faible diamètre on emploiera avantageusement, pour lui donner une nouvelle direction l'isolateur à cloches à une ou deux oreilles (fig. 174).

Celles-ci sont formées d'une plaque de porcelaine percée d'un trou circulaire par lequel on fait passer le conducteur.

Deuxième catégorie. — L'emploi de courants de haute tension nécessite des isolateurs dont la puissance d'isolement soit très élevée et dont la disposition s'oppose autant que possible à la production de pertes par l'humidité ou les poussières.

On obtient ce résultat en interposant une ou deux couches d'huile sur le chemin à parcourir entre la surface extérieure de l'isolateur et le support.

Fig. 174. — Isolateur à oreille.

Isolateur Johnson et Philipps. — Le premier modèle établi par ces constructeurs était formé d'une cloche

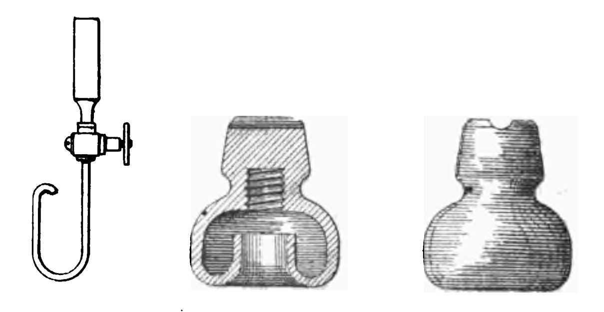


Fig. 175. — Burette. Fig. 176. — Isolateur Johnson et Philipps.

dont les bords inférieurs, relevés intérieurement, for-

maient ainsi une sorte de gouttière que l'on remplissait d'huile (fig. 175 à 177).

Le conducteur est supporté par la tête à gorge et l'isolateur par un support vissé intérieurement, comme dans les types courants.

L'introduction de l'huile se fait à l'aide d'une burette dont le bec très prolongé est recourbé deux fois sur lui-même et se trouve à un niveau inférieur à celui du réservoir.

Dans la suite, les mêmes constructeurs ont établi un modèle plus perfectionné à double garde d'huile (fig. 177).

L'isolateur est fait de deux parties démontables.

L'une, est un cylindre creux, en porcelaine, fileté extérieurement et vissé sur le support. Les bords inférieurs relevés extérieurement forment la gouttière qui recevra l'huile.

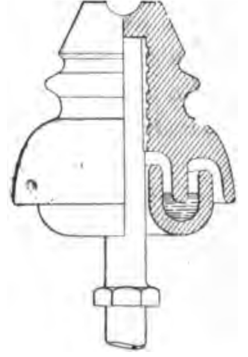


Fig. 177. — Isolateur perfectionné Johnson et Philipps.

L'autre partie se visse sur la première et présente l'aspect d'un isolateur à double cloche, dont l'intérieur plonge dans l'huile.

L'isolateur se trouve ainsi divisé en deux parties dont l'une, en contact avec le support, est complètement isolée de l'atmosphère extérieure.

Les pertes au sol sont très réduites comme on peut en juger par les chiffres du tableau ci-dessous.

Résistance en Megohms

Dates	Par mille Isolateurs à liquide	Par 20 isolateurs Isolateurs ordinaires	Observations
31 janvier	L'isolement à peu près constant a été de 14200 megohms.	542	Beau temps. . . . . . .
1 février		2,62	Pluie. . . . .
3 —		31,18	Matinée claire. . . . .
6 —		9,67	Couvert et humide . . . .
9 —		7,21	Beau temps avec brouillard.
10 —		8,74	Temps couvert . . . . .
12 —		1,10	Pluie. . . . .
16 —		38,10	Temps couvert . . . . .
17 —		48,98	Beau temps. . . . . . .
26 —		0,71	Pluie violente. . . . .
26 —		83	Après la pluie . . . . .
28 —		1437	Froid vif et sec . . . . .

Isolateur Schomburg. — L'isolateur est formé de deux parties démontables comme le dernier type de Johnson et Philipps.

La première, vissée sur le support, a la forme d'un cône légèrement évasé. Elle est formée, en principe de trois réservoirs annulaires superposés qui recevront l'huile (fig. 178).

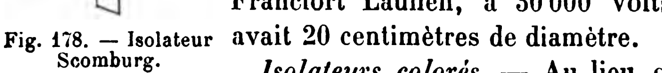


Fig. 178. — Isolateur Scomburg.

La seconde partie est un isolateur à simple cloche vissé sur la première, et dont la tête munie d'une gorge recevra le câble.

Le modèle employé sur la ligne Francfort Lauffen, à 30 000 volts, avait 20 centimètres de diamètre.

Isolateurs colorés. — Au lieu de porcelaine recouverte d'un émail blanc on emploie souvent un émail brun jaune.

Cette disposition a pour objet de rendre les isolateurs

moins visibles et de les soustraire plus facilement aux farces de mauvais plaisants.

Le tableau ci-dessous donne les dimensions et poids des principaux types d'isolateurs.

Désignation	Hauteur	Diamètre extérieur à la base	Diamètre de la cavité recevant le support	Poids approximatif
	mm	mm	mm	kg
I. Isolateurs simple cloche				
Type à oreilles				
Petit modèle	96	54	16	0 255
Moyen modèle	106	56	19	0,270
Grand modèle	111	65	23	0,520
II. Isolateurs double cloche				
Type à oreilles				
Petit modèle	94	69	15	0,360
Grand modèle	145	92	25	1,120
Type à gorge cylindrique supérieure				
Petit modèle	133	73	25	0.660
Grand modèle	156	99	33	1,745
II. Isolateurs double cloche				
Type à gorge rectangulaire				
Petit modèle	125	68	25	0,500
Grand modèle	156	94	31	1,430
Type à gorge supérieure et à tête conique	118	96	20	0,900
Type des Asturies				
Petit modèle	104	66	15	0,540
Grand modèle	131	77	20	0,820
III. Isolateurs à liquide	97	104	25	0,630

La poussière et le pouvoir isolant des isolateurs. — Des mesures très précises et répétées ont été faites pour rechercher l'influence de la poussière sur l'isolement d'une ligne.

On a trouvé que de ce chef une ligne pouvait perdre la moitié de son isolement.

Essai des isolateurs à cloche. — La méthode suivante est générale et applicable à tous les isolateurs, autant bien entendu que leur forme se prêtera à la disposition de l'expérience ci-dessous.

L'isolateur est placé, renversé, dans une auge pleine d'eau acidulée, la cloche plongée dans le liquide sur presque toute sa hauteur.

On remplit aux trois quarts d'eau acidulée la partie creuse de l'isolateur, et l'on plonge une lame de platine dans le liquide de l'auge et une lame de cuivre dans celui que contient l'appareil à essayer.

Ces lames sont montées sur le circuit d'une pile avec un galvanomètre.

S'il existe une fissure dans la masse de l'isolateur, le circuit de la pile sera fermé, le liquide acide s'infiltrant par la fissure, et l'aiguille du galvanomètre sera déviée.

On pourra juger d'après la grandeur de cette déviation la résistance d'isolement de l'appareil.

Il convient d'effectuer cette mesure avec une batterie de piles ou un générateur d'électricité donnant une différence de potentiel au moins égale à celle que l'isolateur devra supporter en service.

Consoles. — Le complément de l'isolateur est la pièce qui servira à le fixer soit au poteau, soit à tout autre appui.

Consoles pour poteaux. — Le modèle le plus employé est la console à patte (Fig. 179).

C'est une tige de fer galvanisée (recouverte d'une couche de zinc) recourbée deux fois sur elle-même à angle droit, dont une extrémité filetée recevra l'iso-

lateur ; l'autre extrémité aplatie porte deux trous pour les tire-fonds qui la fixeront au poteau.

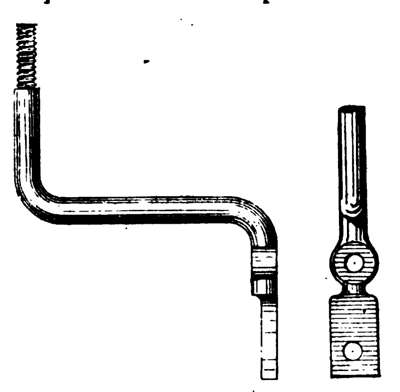


Fig. 179. — Console à patte.

Quelquefois aussi on emploie le modèle suivant (Fig. 180) qui se visse directement dans le poteau et est plus économique que le précédent.

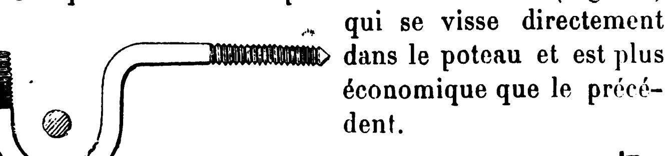


Fig. 180. — Console se vissant directement sur le poteau.

Fig. 181. — Console droite.

Lorsque l'isolateur doit être fixé sur une traverse, on emploie la *console droite* représentée figure 181. C'est une tige rectiligne filetée à ses deux extrémités, pour recevoir l'isolateur et s'engager dans le bois ; elle porte un écrou de serrage. La traverse est prise entre l'écrou et un épaulement ménagé à une hauteur convenable.

Consoles pour murs. — Dans les villes où la distribution se fait par ligne aérienne, on a fréquemment l'occasion de fixer les isolateurs aux murs des maisons.

On emploie, à cet effet, des *consoles* de formes diverses suivant les conditions locales qui peuvent varier d'une maison à l'autre, par l'avancement de la toiture, les mesures de sécurité particulières à prendre, etc.

Fig. 182. — Console à scellement.

Consoles à scellement. — Lorsqu'il est possible, on pratique dans le mur un trou d'une profondeur et d'un diamètre convenables, dans lequel on introduit la tige de la console fendue en queue d'aronde pour augmenter l'adhérence (Fig. 182).

On scelle ensuite au plâtre après avoir au besoin introduit des cales en bois pour éviter une rotation du support autour de l'axe de scellement.

Consoles verticales. — Si l'épaisseur du mur ne permet pas d'y planter directement la console, on emploiera le type suivant (Fig. 183).

La console est faite d'une bande de fer plat ou à nervures suivant l'effort à supporter et recourbée deux fois sur elle-même. L'une des extrémités est destinée à recevoir l'isolateur ; l'autre porte un certain nombre de trous par lesquels passeront les tire-fonds pour le scellement dans le mur.

Fig. 183. — Console verticale.

Fixation des Isolateurs sur les consoles. — On scelle l'isolateur à la console à l'aide de plâtre ; l'emploi du soufre a été abandonné par suite de la différence considérable qui existe entre les coefficients de dilatation de la porcelaine et du soufre et

d'où résulte à la longue, soit une fissure dans la cloche de l'isolateur, soit une séparation de ces deux pièces. Rien d'analogue ne se produit avec le plâtre qui a, en outre, sur le soufre l'avantage du bon marché.

Conditions à remplir pour les consoles. — Aucune règle fixe ne peut être donnée pour la détermination des dimensions linéaires des consoles ; on doit prévoir le poids du câble à supporter et les efforts latéraux ou verticaux produits par l'action du vent ; puis, après avoir déterminé approximativement la valeur de cet effort, vérifier si les consoles ne fléchissent pas sous l'action d'une force égale et perpendiculaire à leur tige.

Voici néanmoins des indications relatives aux ferrures les plus usuelles : diamètre du fer ; longueur ou hauteur donnant la distance de l'isolateur au poteau ou à la traverse ; poids. Le fil est supposé avoir un diamètre maximum de 5 millimètres.

Désignation	Diamètre du fer	Longueur ou hauteur	Poids approximatif
	millimètres	millimètres	grammes
Consoles se vissant directement dans les poteaux	22	260	1 600
	20	240	1 300
	18	220	950
	15	185	480
	14	185	420
	13	150	340
	12	140	160
	10	135	140
Consoles à scellement	25	700	3 200
	22	600	2 200
	20	500	1 530
	18	400	1 060
	16	300	630
	14	260	450
	12	250	300
	10	220	175
	9	200	130
Consoles droites avec embase et écrou	20	140	610
	18	130	600
	14	120	310
	12	110	240
	12	85	180
Consoles à patte	23	400	2 000
	20	220	950
	16	165	520
	12	150	350
	10	140	220
Tirefonds à tête carrée pour les consoles à patte	18	150	»
	16	150	»
	14	140	»
	12	90	»
	10	65	»
	9	55	»
	8	50	»

Si la console est galvanisée, l'épaisseur de la couche de zinc doit être telle que cinq immersions successives, d'une minute chacune, dans une solution de sulfate de cuivre à 20 °/₀ ne mettent pas le fer à nu.

Montage des isolateurs sur les poteaux. — Cette opération s'effectue plus facilement quand le poteau est à terre que quand il est planté.

Le support devra être fixé au poteau par des vis ou des tire-fonds, et jamais par des clous qui tiennent plus ou moins et font éclater le bois.

L'ouvrier monteur devra au préalable orienter exactement le support sur le poteau de telle sorte qu'il n'y ait pas de traction latérale exercée par le fil, puis préparer le logement des vis ou tire-fonds à l'aide d'une vrille de dimension appropriée.

Vis et tire fonds doivent être galvanisés pour ne pas être attaqués par le sulfate de cuivre dont est injecté le poteau.

POTEAUX DE BOIS. PROCÉDÉS D'INJECTION. — POTEAUX DE FER.

POTEAUX EN BOIS. — Les poteaux en bois remplissent toutes les conditions voulues de légèreté, de durée, de résistance à la rupture (celle-ci croît du tronc au sommet) et de bon marché.

Choix de l'arbre. — On doit choisir pour la fabrication des poteaux des arbres en pleine croissance et venus autant que possible dans un terrain sec (gravier, sables granitiques) : un terrain humide donne des bois mous.

L'abattage doit avoir lieu pendant l'arrêt de la sève en hiver, pour éviter les fermentations ultérieures, et faciliter l'*injection* s'il y a lieu d'y recourir.

L'écorçage est fait 30 jours au moins après l'injection et l'on doit enlever environ 1,5 millimètre d'aubier.

Les poteaux ainsi préparés sont empilés dans les dépôts, horizontalement, les uns sur les autres. On facilite la ventilation et par suite le séchage en les séparant par des cales de bois.

Les poteaux doivent être en bois *non gemmés* ; le diamètre doit être intérieur aux 2/3 du diamètre total de l'arbre. On doit exclure les pins Laricio et lord Weymouth qui pourrissent trop facilement.

Durée d'un poteau. — On admet que, sur un lot de mille poteaux utilisés dans des conditions identiques, on aura à remplacer :

1 poteau pendant la 2e année
4 — — — 3e —
4 — — — 4e —
10 — — — 5e —

Dimensions des poteaux. — La hauteur des poteaux varie suivant la topographie des lieux et le danger présenté par le courant de la ligne.

En voici pour trois types les dimensious approximatives, le cubage et le poids réel :

Type	Diamètre en m			Cubage en m3	Poids en kg
	A la base	A la tête	Au milieu		
6 mètres de hauteur	0,160	0,115	0,135	0,0765	30 à 40
8 — —	0,220	0,150	0,180	0,169	90 à 100
10 — —	0,180	0,080	0,150	0,3275	170 à 200

Destruction des poteaux en bois. — L'action successive de l'humidité et de la chaleur amène une décomposition intime du bois qui se réduit en une poussière

brune ; la sécurité de la ligne peut en être compromise.

Cette action destructive des agents atmosphériques s'exerce surtout au ras du sol, mais aussi bien sur la partie extérieure que sur le bout du poteau enfoui dans le sol ; et encore celui-ci est il en outre soumis à l'action des bases ou des acides, suivant la nature du sol, qui se trouvent en contact avec lui.

Les attaques des insectes peuvent, dans certains cas, diminuer dans une large mesure la solidité d'un poteau.

Ce sont surtout les substances azotées et les composés protéïques du bois qui sont le siège des fermentations, et, comme leur proportion varie d'une essence à l'autre, on a été conduit à les éliminer dans les poteaux qui en contiennent une forte proportion, pour les laisser subsister dans ceux qui n'en renferment qu'une quantité minime.

La destruction de ces composés azotés et protéïques s'effectuant par l'*injection*, nous aurons à examiner deux catégories de poteaux :

Poteaux non injectés. — Les essences qui se prêtent à une fabrication sans injection sont : le châtaignier, le peuplier noir, le chêne, certains pins et sapins, le frêne, le bouleau, le hêtre, le peuplier, en un mot les essences à grain serré et ne renfermant, par suite, que le minimum de substances azotées. Les bois de Suède sont très recherchés. Les poteaux de cette catégorie doivent être cependant protégés par le *flambage* ou le *goudronnage.*

Poteaux injectés. — Le pin rouge de Norwège, le pin sauvage du Jura, le mélèze, la sapin des Vosges, l'épicéa, l'érable, ont au contraire un tissu lâche et doivent être protégés artificiellement contre les causes de destruction que nous avons indiquées plus haut.

Procédés de préservation des poteaux. — Quand bien

même le poteau serait fait d'un bois à grain serré, il est prudent de protéger au moins la partie qui sera enfouie dans le sol, si ce n'est même la totalité du poteau.

On obtient ce résultat d'une façon économique et facile par le *flambage* seul ou aidé du *goudronnage*.

Flambage. — On conçoit aisément que, si la surface extérieure du poteau est carbonisée sur une profondeur de $\frac{1}{2}$ millimètre, l'eau et les corps qu'elle tient en suspension seront incapables de traverser ce manteau protecteur pour attaquer le bois lui-même. Ce procédé très ancien de conservation des bois a l'avantage de pouvoir s'exécuter sur place, et il peut être employé sur le trajet même de la ligne électrique, si des forêts voisines fournissent des poteaux à l'état naturel. Il joint à cet avantage le mérite d'être très efficace.

La carbonisation devra avoir lieu, soit sur toute la longueur du poteau, soit sur une longueur de 30 centimètres plus grande que celle de la partie à enfouir.

Le bois devra être carbonisé sur une profondeur de $\frac{1}{2}$ millimètre, et la couche de charbon devra être adhérente et ne pas s'écailler sous l'action de chocs légers.

Procédés de flambage. — On place le poteau *dans la flamme* d'un feu de copeaux bien entretenu. Ce procédé très primitif est difficile à conduire : le poteau brûle toujours plus ou moins. — On place le poteau dans une cornue de métal où l'on fait arriver la flamme d'un foyer à huile lourde, alimenté par une soufflerie. C'est le procédé de Lapparent. — On enduit le poteau de pétrole ou d'huile lourde que l'on enflamme ; s'il y a lieu, on alimente le feu au moyen d'un des combustibles précités.

C'est le procédé le plus facile à employer sur place et il donne de bons résultats.

Goudronnage. — On substitue parfois au flambage la couverture du poteau d'une couche de goudron, de préférence de goudron de bois ; mais, le plus souvent, on combine ensemble flambage et goudronnage.

L'application du goudron devra être faite *aussitôt* après le flambage.

Ce procédé très pratique donne d'excellents résultats.

Prix de revient de ces traitements. — Voici, d'après M. Lazare Weiller, le prix de revient de ces différents traitements appliqués à un poteau de 6 à 8 mètres de longueur.

1. Carbonisation du pied sur une longueur de 1,50 m par flambage aux copeaux	35	centimes
2. Carbonisation du pied sur une longueur de 1,50 m par flambage au gaz.	25	—
3. Carbonisation du pied sur une longueur de 1,50 m par flambage à l'huile lourde . . .	20	—
4. Carbonisation superficielle après badigeonnage au pétrole	15	—
5. Goudronnage du pied	25	—
6. Goudronnage de la tête	15	—
7. Flambage et goudronnage successifs. . .	40	—

Poteaux injectés. — Différents procédés ont été proposés et appliqués au traitement des poteaux, dont le bois fait d'un tissu lâche est imprégné de substances protéiques.

Ils peuvent se ramener à deux classes : les procédés par immersion, aujourd'hui abandonnés, et les procédés par injection.

Le composé chimique incorporé dans le tissu ligneux doit être antiseptique, et, si possible, jouir de la propriété de précipiter l'albumine. Nous donnerons un aperçu des méthodes employées et des résultats auxquels elles conduisent

Injection au sulfate de cuivre Légé-Fleury et Pironnet. — L'appareil est formé d'un long cylindre en tôle de cuivre de 10 mm d'épaisseur pour résister à une pression de 15 atmosphères, relié à un jeu de condenseurs, à une chaudière à vapeur et à un bac renfermant le liquide à injecter fait d'une solution à 2 °/₀ de sulfate de cuivre.

Les poteaux chargés sur un wagonnet pénètrent dans le cylindre que l'on referme et où l'on envoie de la vapeur sous pression ; puis, à l'aide des condenseurs, on précipite la valeur d'eau : le vide se fait et les sucs du bois coulent au dehors.

On établit alors la communication avec le bac à sulfate de cuivre dont le liquide vient remplir tout le cylindre et, grâce au vide, s'infiltrer dans les canaux du tissu ligneux.

L'injection terminée, on refoule l'excès de la solution de sulfate de cuivre dans son bac et l'on procède à une autre opération.

Avec un appareil et une force motrice de 10 à 15 chevaux, on peut faire par 24 heures 8 opérations représentant l'injection de 600 poteaux de 8 mètres de long.

On peut compter sur une dépense de 300 à 400 kg de la solution antiseptique, soit environ de 67 kg de sulfate de cuivre, par mètre cube de sapin, soit 0,600 kg de sulfate par poteau de 6 m à 6,50 m cubant 0,100 m^3.

Il est très important que l'eau qui sert à dissoudre le sulfate de cuivre soit exempte de sels de chaux ; autrement l'action ultérieure de l'acide carbonique provoquerait peu à peu l'élimination du sulfate de cuivre avec mise en liberté d'acide sulfurique.

Le hêtre, le sapin et le peuplier s'injectent bien et acquièrent une durée normale de 12 ans.

Injection au chlorure de zinc. — On utilise un appareil analogue au précédent. Après avoir maintenu pendant 2 heures l'action de la vapeur d'eau à 1,5 atmosphère de pression, quand toute l'humidité du bois est évaporée, on fait le vide pendant 1 heure et l'on refoule sous une pression de 10 atmosphères la solution de chlorure de zinc.

Celle-ci doit marquer 3° Baumé ; elle est faite de 1 partie de chlorure de zinc de densité 1,80 pour 30 parties d'eau.

Le mètre cube de sapin absorbe 223 litres de la solution ci-dessus, soit 1,200 kg de chlorure par poteau de 6 m à 6,50 m.

Injection à la créosote. — La créosote est un puissant antiseptique en même temps qu'elle précipite l'alumine; appliquée par Béthel, puis abandonnée, elle revient aujourd'hui en faveur par l'emploi du procédé Blyte.

L'appareil Blyte comprend :

1. — Un cylindre pour loger les poteaux, muni d'un dôme pour la condensation de la vapeur créosotée et l'égalisation de la pression avec l'appareil voisin quand on mettra ce dernier en marche.

2. — Un condenseur qui recueille et achève la condensation de la vapeur créosotée non utilisée.

3. — Un bac renfermant de l'huile lourde de créosote.

4. — Une chaudière à 6 atmosphères.

5. — Une chaudière à 2 atmosphères.

Une tuyauterie convenable met en communication les deux chaudières avec le cylindre, les chaudières entre elles, la chaudière 4 avec le bac à créosote, la chaudière 5 avec le bac à créosote et le condenseur.

Voici la marche de l'opération : L'eau de la chaudière 4 ayant reçu du bac la quantité voulue de créosote, on fait barboter la vapeur à 6 atmosphères dans le bouilleur de la chaudière 5, et l'on fait arriver la vapeur dans le four. L'ajutage est construit comme un injecteur et la vapeur à 6 atmosphères aspire la vapeur créosotée plus lourde ; l'attaque du bois se produit aussitôt.

Les produits de condensation sont renvoyés à la chaudière 4 par le condenseur, et le bac à créosote soumis à l'action de la vapeur à 6 atmosphères continue à alimenter la chaudière 4 du produit antiseptique.

Après une demi-heure, la pression dans le four atteint 6 atmosphères ; on l'y maintient pendant trois quarts d'heure, après quoi l'opération est terminée.

En pratique, les fours sont montés par batterie de 3 ; pendant que l'un travaille, on décharge le second et on charge le troisième.

La chaudière à 6 atmosphères doit fournir à l'heure environ 250 kg de vapeur.

Il faut compter sur une dépense de 5 kg d'huile lourde vaporisée par heure.

Une batterie de 3 fours permet de traiter par jour 500 poteaux. Un poteau de 6,50 m exige l'emploi de 2,5 kg de créosote, et son traitement coûte entre 80 et 90 centimes.

Injection au sulfate de cuivre. — Au plus tard 10 jours après la coupe, les poteaux, après avoir été ébranchés mais non écorcés, sont sciés perpendiculairement à l'axe à quelques millimètres des extrémités ; on rafraîchit ainsi les sections.

Ils sont disposés parallèlement entre eux, et au besoin

en étages séparés par des traverses, le gros bout de chaque poteau étant plus élevé que le petit.

L'injection ayant lieu par le tronc, on coiffe celui-ci d'une sorte de cylindre en caoutchouc fort ou en cuir, dont la base porte un fond de chêne : une couronne de chanvre, qui ne doit porter que *sur l'écorce* du poteau, laisse un petit intervalle entre le fond du cylindre et le poteau.

On ferme hermétiquement cette sorte de boîte en serrant fortement par des cordes les parois du cylindre sur le poteau, et on assure la solidité du tout en vissant dans le cœur de l'arbre une tige filetée boulonnée sur le fond du cylindre.

Des bacs de récupération sont placés sous les poteaux. Ils recueillent le liquide cuprique qui s'écoule.

Tout à côté du chantier on dresse un échafaudage qui supporte un nombre convenable de bacs renfermant une solution de sulfate de cuivre à 1 °/₀. La hauteur des bacs au dessus des poteaux doit être de 6 à 10 mètres, un peu supérieure à la longueur des poteaux à injecter.

Les bacs sont reliés par un tuyau de caoutchouc aux fonds des cylindres qui coiffent les poteaux, et sous l'effet de la pression le liquide pénètre peu à peu le bois et chasse des liquides organiques.

Des pompes refoulent dans les bacs supérieurs la solution de sulfate de cuivre qu'il peut y avoir lieu d'ajouter.

La solution de sulfate de cuivre doit contenir au plus 1,5 °/₀ de sulfate de fer et être exempte de sels de chaux ; elle marque 1° Baumé.

La hauteur de chute varie avec la longueur des poteaux ; en voici la valeur dans les différents cas :

Longueur des poteaux	Hauteur de chute
6 à 8 mètres	6 à 8 mètres
8 à 9 —	8 à 10 —
10 —	10 à 12 —
12 à 13 —	15 —

La durée de l'injection est proportionnelle au carré de la longueur du poteau et en raison inverse de la pression. Voici quelques indications sur sa valeur moyenne:

Longueur des poteaux de sapin	Durée de l'injection
6 à 6,50 mètres	4,5 jours
7 —	5,5 —
8,50 —	8,5 —
10 —	12,0 —

Ce n'est que trente jours après l'injection que les poteaux sont écorcés, planés et mis en chantier pour le séchage.

Un mètre cube de sapin absorbe 550 litres de solution, soit 5,5 kg de sulfate de cuivre; un poteau cubant 0,100 m³ absorbe 55 litres de solution soit 0,550 kg de sulfate de cuivre et son traitement revient à 80 centimes environ.

On peut faire des poteaux en bois de 12 et même 14 mètres ; mais au delà il faut recourir à des poteaux en fer. Nous diviserons ceux-ci en deux catégories, les poteaux proprement dits jusqu'à 26 mètres de hauteur, et les *pylones* pour des hauteurs supérieures qui peuvent atteindre 50 mètres.

Poteaux de fer. — Dans certains cas on préfère em-

ployer des poteaux en fer. Ceux-ci peuvent être faits, si leur hauteur est réduite, par une bande de fer en double T ou de fer cornière ; s'ils doivent avoir plus de 4 à 5 mètres de longueur, on doit employer des poteaux d'une construction plus compliquée.

Les premiers seront bons à être scellés sur le haut d'un mur, d'une maison ; les seconds pourront être employés le long des rues des villes et dans les campagnes.

La description des poteaux en fer à T découlant de la définition même de la matière employée, nous ne nous y arrêterons pas.

Quant aux seconds, leur nomenclature sortirait du cadre de cet ouvrage, et nous ne nous arrêterons qu'à quelques types intéressants. Nous prions le lecteur que la question intéresse de se reporter au traité des *Lignes et Transmissions Électriques*, de MM. Lazare Weiller et Vivarez.

Poteaux en fer Zorès. — Ils sont faits par l'assemblage de bouts Zorès de 7 mètres de longueur : les dimensions des fers vont en décroissant de la base au sommet.

On assemble des fers Zorès deux à deux en rivant leurs plates-bandes de façon à former une sorte de tube en double V, et chaque tube est relié au suivant par un collier.

On fixe à la base du poteau une large pièce d'assise destinée à être noyée dans un massif de maçonnerie.

D'après M. Morris un poteau en fers Zorès de 10 m de hauteur pèse 160 kg et revient à 95 fr, sans compter les colliers et les bras pour recevoir les isolateurs.

Poteaux Fives-Lille-Lazare Weiller. — M. Lazare Weiller a étudié plusieurs types de poteaux métalli-

ques dont la longueur peut au besoin être divisée en deux ou plusieurs parties.

Dans le type n° 1 (Fig. 184), le poteau pénètre dans le sol et s'y encastre à la manière ordinaire. La base est formée d'un manchon en fonte sur lequel sont rivés les montants.

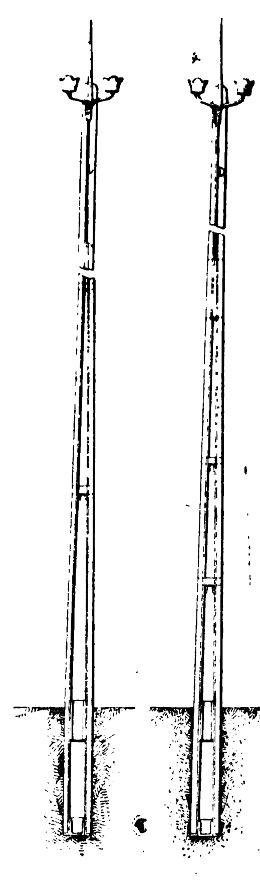


Fig. 184. — Poteaux-Lazare Weiller.

La partie du type n° 2 (Fig. 185 gauche) destinée à être noyée dans le sol est formée d'une pièce filetée que l'on visse dans un manchon-écrou fixé dans le sol.

Le type n° 3 (Fig. 185 droite) a été étudié pour fixation sur un rocher. A cet effet on perce dans le roc quatre trous correspondant aux 4 arêtiers du poteau et on scelle ce dernier au ciment.

Le type n° 4 est un poteau tendeur ; plus résistant que les précédents, il est muni de haubans pour la traversée des courbes.

Ces poteaux construits en longueurs de 5,95 m à 6,40 m, pèsent de 70 à 135 kg et présentent une charge de rupture comprise entre 240 et 500 kg.

Poteau tubulaire Siemens. — Ce poteau comprend trois parties :

1° Une assise en tronc de pyramide faite de 4 plaques de fer rivées ensemble et dont la base supérieure porte un trou à

chacun de ses quatre angles pour recevoir le boulon qui fixera le collier de la partie inférieure du socle.

2° Celui-ci est un tube de fonte légèrement conique, évasé à sa partie supérieure ; il recevra le poteau proprement dit.

3° Le poteau formé d'un tube en fer forgé est scellé au socle par un mélange de soufre et d'oxyde de fer.

L'assise est quelquefois remplacée par un tube conique creux, en fonte, que l'on enfonce dans le sol en frappant à la masse sur un mandrin enfilé dans ce tube.

Poteaux d'exhaussement. — On comprend dans cette catégorie les poteaux d'une longueur supérieure à 10 mètres, et que l'on emploie pour franchir soit un obstacle au-dessus du sol soit de grandes distances, une rivière par exemple.

Les poteaux creux se prêtent très bien à la jonction d'une ligne aérienne et d'une ligne souterraine.

On peut placer à hauteur d'homme une boîte à coupures qui permet d'isoler un fil de ligne ou de le réunir à un autre fil.

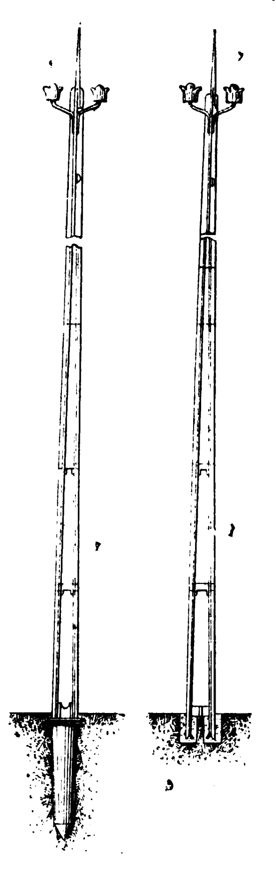


Fig. 185. — Poteaux Lazare Weiller.

Les fils de ligne descendent par l'intérieur du poteau et aboutissent chacun à une borne isolée : une autre borne est

reliée au prolongement aérien ou souterrain du fil ainsi coupé, et, à l'aide d'une liaison mobile entre les deux bornes, on peut couper ou fermer un circuit et faire toutes les combinaison possibless entre les fils.

Poteau Opermann. — Formé par un assemblage de fers à T, il a la forme d'une pyramide quadrangulaire dont la base est enfoncée de 2 mètres dans le sol. Sa partie supérieure est faite par 2 fers à T adossés l'un à l'autre, qui supportent les isolateurs.

Le modèle de 18 mètres a été employé en vue de la traversée de la Marne à Château-Thierry.

Voici des données sur les différents types créés par M. Opermann.

	Poteau		
	de 8 mètres	de 10 mètres	de 18 mètres
Poids	122 kg	206 kg	1 147 kg
Prix du poteau	79,50 fr	134 fr	873,45 fr
Frais de transport, de fouilles, de maçonnerie, de peinture, etc.	28,15 —	43,20 —	479 —
Prix total	107,65 fr	177,20 fr	1 352,45 fr

Pylone Fives-Lille-Lazare Weiller. — M. Lazare Weiller a été amené à étudier et à construire des pylones dont la hauteur atteint quelquefois 50 mètres, et qui sont utilisés pour la traversée des grands fleuves. Ils peuvent également trouver leur emploi comme tourelles de concentration dans les villes, surtout si la ligne est parcourue par un courant de très haute tension.

La figure 186 ci-contre montre la disposition du type dit de 50 mètres.

Les pylones sont munis d'échelles et de paliers de

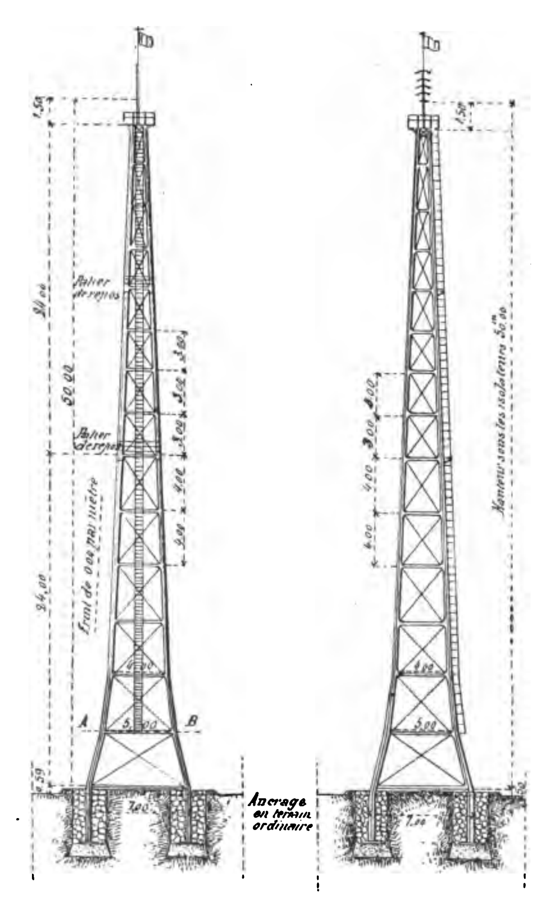


Fig. 186. — Pylones Lazare Weiller.

repos, et d'une plate-forme de couronnement avec galerie.

Voici les données des 2 types de 25 et 50 mètres :

	Pylône de 25 mètres	Pylône de 50 mètres
Poids	5 500 kilogrammes	14 000 kilogrammes
Prix à l'usine . . .	4 500 francs	10 000 francs
Terrassements . . .	250 à 300 —	500 à 700 —
Maçonnerie	1 800 à 2 000 —	3 000 à 3 500 —
Montage	600 à 880 —	2 000 —

Haubans. — Ce sont des cordes en fil d'acier tressé qui servent à consolider un poteau soit contre l'action du vent soit contre la traction exercée par les fils de ligne.

Le hauban part généralement du sommet du poteau et il aboutit à une tige métallique terminée par une œillère et scellée dans un bloc de maçonnerie.

La distance de la tige de scellement au pied du poteau varie avec la hauteur du poteau et la valeur des forces auxquelles le hauban doit faire équilibre.

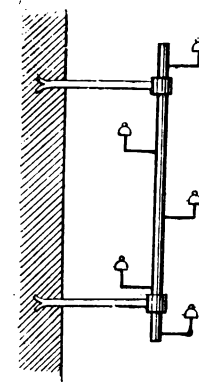
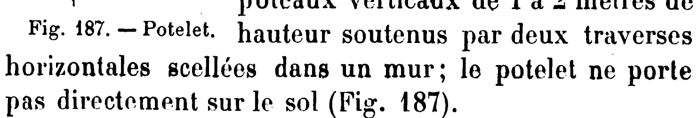


Fig. 187. — Potelet.

L'adjonction de haubans aux poteaux placés au sommet des courbes est une mesure prudente.

Pour assurer la stabilité d'un poteau d'une grande hauteur, il est indispensable d'employer deux et quelquefois quatre haubans.



Potelet. — On désigne ainsi les poteaux verticaux de 1 à 2 mètres de hauteur soutenus par deux traverses horizontales scellées dans un mur ; le potelet ne porte pas directement sur le sol (Fig. 187).

Les matières les plus diverses peuvent être utilisées à la construction des potelets : le bois, les fers à T simples ou réunis deux à deux, les tubes de fer, les fers Zorès, etc., etc.

D'une façon générale, le potelet est supporté par deux consoles horizontales scellées dans un mur, une façade de maison, une pile de pont, etc... On devra fermer hermétiquement les extrémités des potelets tubulaires.

Les fils de ligne seront répartis soit d'un côté soit de part et d'autre du potelet.

PLANTATION DES POTEAUX. — HAUBANNAGE. — JUMELAGE

Plantation des poteaux. — Cas d'un poteau isolé. — Il y a deux points à considérer, le profil de la fosse et le mode de remplissage après mise en place du poteau.

Ouverture de la fosse. — Le terrain devra être remué le moins possible, et l'on donnera à la fosse le

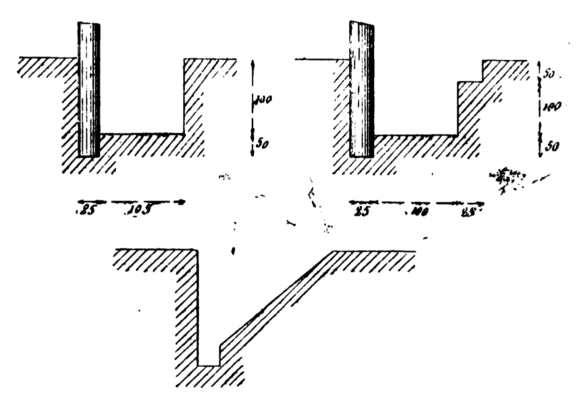


Fig. 188. — Fosses pour poteaux.

profil et les dimensions cotés d'autre part suivant la profondeur d'enfouissement.

La Fig. 188 se rapporte à une profondeur de 1,50 mètre.
— — — — de 2 mètres.
— est une variante de la précédente.

La largeur de la fosse est uniforme pour les trois cas ; 50 centimètres suffisent amplement.

On notera que le logement de l'extrémité du poteau devra être cylindrique.

Mise en place du poteau. — On dresse le poteau et on engage sa base dans le logement cylindrique qui lui a été préparé.

Le poteau est ensuite amené à la verticalité, ce que l'on vérifie par deux visées au fil à plomb dans des plans rectangulaires ; on le soutient par des étais pendant le remplissage de la fosse.

Cas de deux poteaux jumelés. — La fosse doit être dirigée dans le plan de consolidation et présenter deux logements cylindriques pour recevoir les extrémités inférieures des deux poteaux.

Le jumelage se fait à terre, et, pour éviter des ruptures lors de la mise en place, on réunit les deux poteaux au tiers de leur hauteur par deux traverses de bois placées en croix et reliées entre elles par un tirefonds.

Les poteaux se trouvent pris entre les branches de l'X horizontal formé par les traverses comme le montre la Figure 190.

Mise en place. — Le système est dressé dans la fosse, et l'on vérifie à l'aide du fil à plomb la verticalité du poteau support, comme dans le cas précédent.

On soutient avec des étais pendant le remplissage.

Remplissage de la fosse. — On doit éviter l'emploi de

fondations en maçonnerie dont le carbonate de chaux attaquerait le sulfate de cuivre injecté dans le poteau, mais combler avec des couches alternées de cailloux et de terre, chacune soigneusement damée.

On placera des pierres plates sous le poteau de support pour éviter qu'il s'enfonce dans le sol.

Le poteau doit, après avoir été planté, laisser subsister entre la ligne et le sol une distance suffisante pour la libre circulation.

Le tableau ci-dessous donne, pour les types en usage en France, la profondeur de la plantation et les efforts maxima que le poteau de bois peut supporter.

Longueur du poteau	Diamètre à un mètre de la base	Diamètre à la tête	Profondeur de plantation	Effort au sommet	Effort au deuxième sommet
mètres	mètres	mètres	mètres	kilogrammes	kilogrammes
6,50	0,14	0,09	1,50	28	34
6,50	0,17	0,12	1,50	41	56
8	0,18	0,13	2	56	66
10	0.22	0,14	2	75	81
12	0.26	0,17	2	78	110
15	0,32	0,22	3		

Consolidation des poteaux. — Il est souvent nécessaire de contre-balancer l'effort exercé par la ligne, effort qui tend à courber le poteau : tel est le cas pour ceux qui sont placés aux sommets des courbes.

On emploie deux moyens :

le haubannage,

le jumelage.

Haubannage. — On relie la partie faible à un point fixé au sol par une corde en fil d'acier.

Le point d'attache au sol est généralement l'extré-

mité bouclée d'une barre noyée dans un massif de maçonnerie.

La tension du hauban se règle avec un tendeur.

La direction de la résultante des efforts exercés sur le poteau et le hauban doivent être contenus dans un même plan.

Il y a souvent lieu d'appliquer deux haubans partant d'un même point du sol et aboutissant l'un au-dessus et l'autre au-dessous des isolateurs extrêmes. On évite aussi la courbure de la partie supérieure du poteau.

Les haubans favorisent les pertes au sol et ne sont pas fréquemment employés surtout sur les lignes à haute tension.

Jumelage. — On entend par jumelage l'accouplement de deux poteaux de mêmes dimensions.

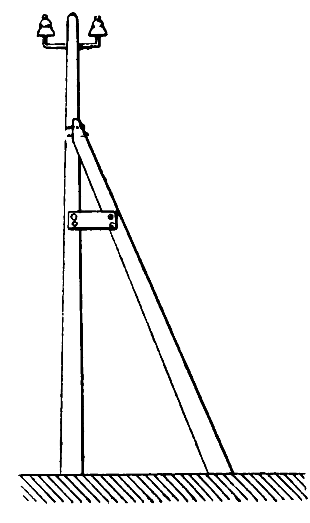


Fig. 189. — Poteau jumelé.

La résistance offerte par deux poteaux jumelés est égale à 5 fois celle d'un poteau isolé.

Le jumelage peut se faire de différentes manières dont voici les plus usitées.

On pratique une entaille à hauteur convenable dans le poteau qui doit être vertical, et l'on coupe en biseau l'extrémité du second, de telle sorte que les deux surfaces entaillées se superposent (Fig. 189).

Les deux poteaux sont assemblés l'un avec l'autre

soit par des tirefonds, soit par un ou deux colliers en métal.

Le poteau de secours, au lieu d'être incliné sur le premier, peut lui être parallèle.

On utilise alors le mode de jumelage préconisé par M. Barbarat (Fig. 190 et 191) et qui consiste à réunir les deux poteaux par deux fers cornière pesant 3 kg le mètre courant et réunis en forme d'une croix de Saint-André.

Ce système est indéformable et permet d'utiliser les deux côtés du poteau pour le montage des isolateurs.

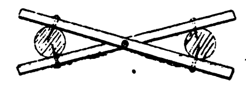


Fig. 190. — Jumelage de deux poteaux.

L'accouplement se fait à terre avant la plantation, et l'effort exercé par la ligne tendra à arracher l'un des poteaux et à enfoncer le second.

Frais de pose d'un poteau. — L'ouverture de la fosse et les frais de pose dû poteau reviennent environ à :

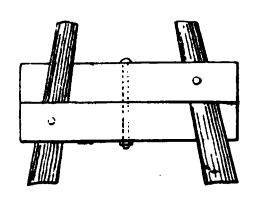


Fig. 191. — Jumelage de deux poteaux.

2,50 fr en terrain ordinaire ;

3,60 fr en terrain rocailleux ;

5 fr dans le roc.

A cette première dépense il faut ajouter :



0,20 fr pour peinture de la tête ;

0,10 fr par isolateur pour fixation.

CHAPITRE XIV

MONTAGE DE LA LIGNE AÉRIENNE. — TENDEURS. — JONCTIONS.
ÉPISSURE DES CONDUCTEURS.

Installation de la ligne.

Les poteaux et autres supports étant mis en place, il reste à poser les conducteurs sur leurs supports et à arrêter leurs extrémités.

Mais tout d'abord il faudra déterminer la tension aux points d'attache de façon à ne pas amener la rupture du fil sous son propre poids ; ce calcul n'a lieu d'être fait que dans des cas particuliers, et dans la pratique courante on le néglige, sauf quand la portée est très grande.

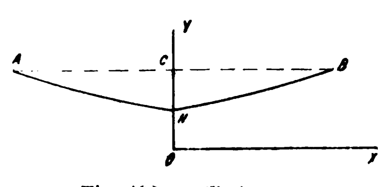


Fig. 192. — Chaînette.

Un conducteur suspendu par deux points prend en effet une courbure sous l'influence de la pesanteur, et l'équation de cette courbe dit *chaînette* est :

$$y = \frac{h}{2}\left(e^{\frac{x}{h}} + e^{\frac{x}{h}}\right),$$

e étant la base des logarithmes népériens,

h la distance O H telle que $h = \frac{T}{f}$,

T la tension au point le plus bas du fil, en kg,
f le poids, en kg, du fil par mètre de longueur,
A et B les points d'attache du fil A H B.

Si l'on désigne par :
D la densité du métal du conducteur,
a la portée AB exprimée en mètres,
l la flèche CH — — —,
L la longueur développée du fil AHB, exprimée en mètres,
t la charge de rupture ou ténacité, en kg par millimètre carré de section,
on déduit de l'équation précédente les relations suivantes :

$$l = \frac{5\, a^2\, D}{8\,000\, t}.$$

L'introduction du coefficient 5 provient de ce que l'on ne doit pas donner au fil une tension supérieure à 1/5 de la charge de rupture.

La tension T réduite à 1/5 de la charge de rupture sera

$$T = \frac{a^2\, D}{8\,000.\, l},$$

et la longueur développée :

$$L = a + \frac{8\, l^2}{3\, a}.$$

En résumé, la flèche varie proportionnellement au carré de la portée et en raison inverse de la tension, et l'application de ces formules permettra de calculer la flèche que doit donner le conducteur pour que la tension ne dépasse pas une limite fixée.

Un abaissement de la température réduisant la lon-

gueur de la courbe augmente la tension ; aussi, pour les petites portées, quand la température de la ligne peut être susceptible de s'abaisser de 20 degrés au dessous de la température normale moyenne, est-il bon d'augmenter la longueur de la flèche et par suite celle du fil entre deux supports consécutifs.

— Le fil de ligne est déroulé à terre, au pied des supports, puis placé successivement sur chacun d'eux, ligaturé aux isolateurs de distance en distance, enfin arrêté à ses deux extrémités. Ces manœuvres nécessitent quelque soin et se font généralement par les procédés qui vont être décrits.

Tableau donnant en kilogrammes par millimètre carré de section du conducteur : *la* charge pratique, *la* tension limite *et la* charge de rupture, à la traction, *de divers métaux usuels.*

Désignation	Charge pratique	Charge limite	Charge de rupture
Fer	7	14	40
Tôle	7	14	35
Fil de fer	12	22	65
Fonte	2,5	7,5	12,5
Acier cémenté	13	27	75
Acier fondu	30	60	100
Fil d'acier	19,2	»	115
Cuivre laminé { écroui	6,6	14	»
Cuivre laminé { fondu	2,5	3	21
Fil de cuivre	6,6	12	42
Laiton	2,5	4,85	12.4
Fil de laiton	6,6	13,3	36.5
Bronze	2	3	25,6
Zinc	»	2,3	5.26
Plomb	»	1,05	1,3
Fil de plomb	»	0,47	2.2
Etain	»	»	3,5
Aluminium	»	»	20.3
Bronze chromé	7 à 12	»	45 à 75
— phosphoreux	5 à 7	»	30
— silicieux	12 à 15	»	70
Fil bimétallique	12 à 15	»	75

Le tableau suivant donne pour la température de 0° C la longueur de la flèche atteinte par des fils de différents métaux usuels pour des portées comprises entre 50 et 400 mètres :

Flèches, en mètres, à 0° C, à la tension normale (1/5 de la charge de rupture)

Portées ou distances entre les supports, en mètres	50	100	150	200	250	300	350	400
Flèches	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres
Bi-métallique .	0,184	0,776	1,749	3,112	4,865	7,012	9,555	12,495
Bronze. . . .	0.219	0,877	1,377	3,517	5,497	7,924	10.394	14.119
Fer	0.242	1,020	2,186	3,890	6,081	8,765	11,943	15,619
Cuivre. . . .	0,388	1,552	3,498	6,224	9,730	54,024	19,110	24,990

Dévidage du fil. — Suivant son diamètre et le poids des couronnes, le fil est livré en couronnes séparées ou enroulées sur des tourets.

Dans le premier cas, le déroulement s'opérera à la

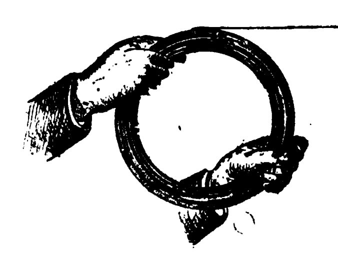


Fig. 193. — Mode rationnel de dévider du fil.

main ou sur l'épaule ; dans le second, en roulant le touret le long de la ligne, au fur et à mesure de la pose du fil sur les isolateurs.

Dans le déroulement à la main, on devra éviter de

faire porter la couronne sur le sol ; si le fil est isolé, la couche protectrice serait détériorée par le frottement sur les cailloux, et si le fil est nu, sa surface se trouverait altérée pour la même cause.



Fig. 194. — Mode défectueux de dévidage du fil.

Lors du déroulage à la main, il faut éviter la formation des boucles et opérer comme l'indique la Figure 193.

Le déroulage sur *touret* ou *dévidoir à manivelle* ne nécessite aucune explication particulière.

Soudure et jonction des conducteurs. — Il est fort rare que la couronne ou le touret comporte la longueur de conducteur correspondant à un circuit, et l'on a très souvent à réunir à la suite l'un de l'autre soit le fil de plusieurs couronnes, soit un bout provenant d'une couronne précédemment employée à celui d'une couronne encore intacte.

La liaison des conducteurs se fait à terre avant leur pose sur les isolateurs.

Elle peut s'effectuer, pour un même cas, suivant des méthodes différentes, et le procédé varie de plus suivant que le conducteur comprend un ou plusieurs brins. La liaison doit être suffisamment résistante pour ne pas se rompre sous l'effort de traction exercée en chaque point de la ligne, et, en outre, ne pas réduire la section utile du conducteur.

Voici du reste la longueur moyenne du fil d'une couronne, longueur variable avec le diamètre :

Diamètre du fil	Poids de la couronne	Longueur de fil
2 millimètres	8,5 kg	500 m
2,5 —	12 —	272 —
3 —	15 —	238 —
4 —	20 —	270 —
5 —	35 —	280 —

Par contre, la longueur des *câbles* sur tourets n'est limitée que par la difficulté de rouler ces derniers.

Jonction des fils simples. — La continuité de deux bouts de fil simple ne peut être assurée par une soudure, l'expérience ayant démontré que toute soudure était un point faible tant au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique.

Il faut avoir recours à une *ligature* ou à l'adjonction d'un *manchon de raccordement.*

Ligature simple. — Les extrémités des deux bouts sont juxtaposées sur une longueur de 20 centimètres environ et prises chacune dans une *mâchoire à tordre,* sorte d'étau mobile dont on fait tourner les poignées en sens contraires (Fig. 197). Les deux fils s'enroulent l'un sur l'autre.

Pour assurer la solidité du système, on rabat sur la ligature les extrémités des bouts que l'on enroule à leur tour sur la partie commune des deux fils.

Ligature double. — On saisit les extrémités des deux bouts dans une mâchoire à tordre, et l'on enroule sur chaque brin l'extrémité de l'autre (Fig. 195).

Il est bon dans les deux procédés ci-dessus de couler de la soudure sur les deux ligatures pour assurer la cohésion du système par la bonne conductibilité du joint.



Fig. 195. — Ligature double.

Autre forme de ligature. — Les extrémités des deux bouts sont recourbées à angles droits sur elles-mêmes, superposées sur une longueur de quelques centimètres et réunies par de la soudure ; on les recouvre ensuite d'un enroulement fait avec un fil distinct, et l'on consolide le tout par de la soudure.

Ligature rationnelle. — M. Lazare Weiller, dont la compétence en pareille matière fait autorité, donne la préférence à la ligature obtenue dans les conditions suivantes : les extrémités des deux bouts sont superposées sur une longueur de 8 à 10 cm et enroulées chacune en hélice autour des deux fils. Les extrémités des deux fils se rejoignent au milieu de la ligature et sont tordues ensemble.

Les essais qui ont été faits ont montré que, sous une charge suffisante, le fil se rompait toujours ailleurs qu'en un point quelconque de la ligature.

Outillage pour la confection des ligatures. — Pour maintenir en contact les extrémités des fils et empêcher que leur enroulement réciproque ne soit gêné par la torsion du fil de ligne sur une certaine longueur, on fixe chacun d'eux à demeure dans une sorte d'étau.

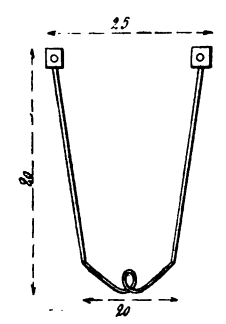


Fig. 196. — Fourche.

On peut réaliser cette disposition de bien des manières différentes, et l'on construit même une *fourche* (Fig. 196) destinée à cet usage.

Cette fourche est une sorte de V en fer portant à l'extrémité de chacune de ses branches une borne de serrage. L'écartement des deux bornes est de 25 à 30 cm. On prend dans chaque

borne un des fils à ligaturer de façon qu'ils avancent l'un sur l'autre d'une quantité convenable, on serre les bornes de serrage, et, à l'aide d'une pince Grief, d'une mâchoire à tordre ou de l'outil à ligatures, on effectue la jonction des deux fils.

Pince Grief. — Représentée ci-après, Fig. 198 et 199, cette pince dite *universelle* peut être utilisée :

1° comme pince à joues lisses ;
2° — tenaille pour fils de faible diamètre ;
3° — pince coupante pour gros fils ;
4° — pince pour tendre le fil à l'aide de l'anneau ;
5° — clef pour visser ou dévisser ;
6° — clef anglaise ;
7° — tourne-vis ;
8° — lime.

Mâchoire à tordre. — C'est un étau à main terminé par deux poignées pour la facilité de la manœuvre.

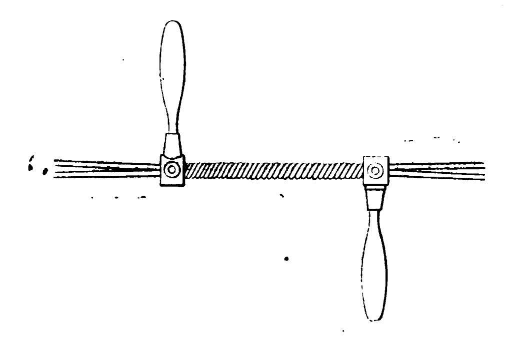


Fig. 197. — Mâchoire à tordre.

Outil à ligatures. — Il est formé d'une bande d'acier dont l'extrémité supérieure recourbée porte un trou circulaire dans lequel on engage l'extrémité du fil.

La rotation de l'outil autour de l'axe de la ligne détermine un enroulement très règulier.

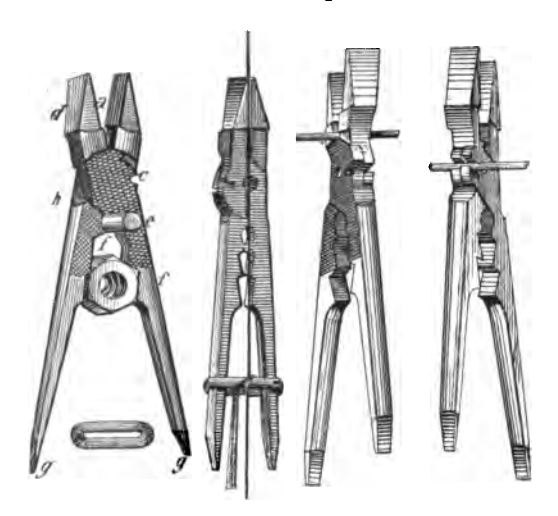


Fig. 198 et 199. — Pince Grief.

L'extrémité inférieure de la bande d'acier est montée dans une poignée.

Accouplement par manchons. — Les *manchons* sont des étuis métalliques dans lesquels les extrémités des deux fils sont engagées et maintenues en contact.

Le manchon doit être de même métal que les fils de ligne ; il sera de cuivre pour le cas qui nous intéresse.

Fig. 200. — Manchon Baron.

Manchon Baron. — C'est un tube de cuivre portant à chaque extrémité une échancrure pour recevoir l'extré-

mité recourbée du fil de ligne, et une fente longitudinale (fig. 202).

On décape l'intérieur du manchon au chlorure de zinc, on passe les deux fils que l'on recourbe à leur extrémité, et après avoir réchauffé la jonction, on coule par la fente longitudinale de la soudure prête à faire prise et formée de 2/3 de plomb et 1/3 d'étain.

En suivant ces prescriptions on évitera de réunir les fils.

Manchon Mac Intire. — Le dispositif suivant a été employé pour la jonction de fils de 1 centimètre de diamètre.

Deux tubes de cuivre d'un diamètre approprié à celui de la ligne sont soudés l'un contre l'autre, et dans chacun d'eux on passe un fil de ligne. A l'aide de pinces d'une forme spéciale on tord, l'un sur l'autre, tubes et fils. Il n'est pas besoin d'employer de soudure.

Joint Banta. — On passe les deux fils dans une série d'anneaux elliptiques soudés à une barrette longitudinale. On recourbe ensuite à angle droit les extrémités des deux fils (fig. 201).

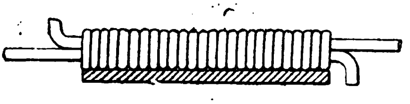


Fig. 201. — Joint Banta.

Jonction des câbles nus.

La jonction de deux câbles devra satisfaire aux mêmes conditions que celle des *fils*, aux points de vue mécanique et électrique ; on devra en outre veiller à ce que le diamètre ne se trouve pas augmenté d'une façon trop sensible.

Il y a lieu de distinguer le cas de câbles à un toron ou à plusieurs torons.

Câble à un toron. — On dénude l'extrémité d'un des câbles sur une longueur de 30 centimètres de longueur,



Fig. 202. — Câble dénudé.

et on la dépouille de ses fils de façon à former de 3 à 4 échelons, comme le montre la figure ci-contre.

On déroule l'extrémité de l'autre câble sur une longueur de 50 à 60 centimètres, et l'on forme sur second câble des échelons en ordre inverse de ceux du premier.

A l'aide d'une ligature, on maintient serrés les uns contre les autres les fils de chaque couronne du premier câble.

On fait ensuite pénétrer le premier câble dans le second, on enroule en hélice sur sa couronne centrale les fils épanouis de la partie correspondante du second câble, et l'on assure un bon contact des deux couronnes à l'aide d'une pince et l'on consolide par de la soudure à l'étain.

On fait de même pour chaque couronne.

Le décapage des fils à souder doit être fait au suif et non à l'acide.

Câbles à plusieurs torons. — Sur chacun des câbles on coupe la moitié des torons en couverture, en laissant un toron intact entre deux torons coupés et l'on tranche l'âme d'un des câbles au niveau des torons, soit sur une longueur de 80 à 110 fois le diamètre.

On entre les deux câbles l'un dans l'autre en faisant

pénétrer les pleins de l'un dans les vides de l'autre, et on effectue séparément la ligature de chaque toron comme il a été indiqué plus haut.

Les câbles à plusieurs torons sont peu employés dans les canalisations aériennes, en raison de leur poids.

Branchements en T. — On a fréquemment à brancher sous un certain angle des conducteurs sur les câbles principaux.

Quand les conducteurs et les câbles sont de fort diamètre, on doit se servir de *boîtes de branchement*, car il serait impossible de procéder par épissure.

Si, au contraire, le conducteur à dériver est de faible diamètre, on courbera son extrémité de l'angle sous lequel le branchement doit être fait et l'on décordera ses brins. Ceux-ci seront appliqués sur le câble principal de façon à l'entourer complètement si possible, solidement maintenus par une ligature, et l'on recouvrira de soudure la partie commune aux deux câbles.

Le conducteur n'a souvent que quelques millimètres de diamètre et dans ce cas l'opération est plus simple. Son extrémité est recourbée comme précédemment, aplatie au marteau et appliquée par sa base la plus large sur le câble. Une ligature maintiendra l'ensemble, ligature qui peut s'il en est besoin être recouverte de soudure.

Quand le branchement doit être pris sur un fil de faible diamètre, on enroule les deux conducteurs l'un autour de l'autre et l'on redresse le branchement dans la direction voulue. On pourra assurer l'adhérence des deux fils par l'addition de soudure.

Jonction des câbles isolés

Quand les deux conducteurs réunis entre eux, soit bout à bout, soit autrement, sont isolés, il est assez naturel que leurs points communs qui ont été dénudés reçoivent une nouvelle couche protectrice ; dans certains cas l'application de cette couche est indispensable.

On pourra, suivant la résistance d'isolement à obtenir, recouvrir le point de jonction des câbles soit de ruban chattertonné, soit d'une bande de caoutchouc et de ruban caoutchouté, soit même de plusieurs couches alternées de caoutchouc de ruban caoutchouté, le tout recouvert d'une couche de jute goudronné.

En un mot on cherchera autant que possible à donner à l'épissure la même résistance d'isolement qu'au reste du câble.

Câbles concentriques. — La jonction bout à bout ou sur un certain angle de deux câbles concentriques présente de sérieuses difficultés,et l'on fait presque toujours usage de *boîtes de jonction*, que l'on trouvera décrites dans le chapitre consacré à la canalisation souterraine.

Si l'on veut se passer de cet auxiliaire on opère comme suit selon que les deux câbles doivent être raccordés bout à bout ou sous un certain angle.

Raccordement. — On détord les extrémités des deux câbles après avoir enlevé les couches protectrices et l'on opère comme s'il s'agissait de câbles à un toron. Puis on recouvre la jonction de matière isolante et d'une enveloppe métallique, s'il y a lieu.

Branchement en T. — L'enveloppe protectrice du câble *posé* est enlevée sur une certaine longueur et les fils

de la couronne sont séparés en deux paquets de façon à permettre l'accès de l'âme.

On détord la couronne du bout à rapporter de façon à rendre libre le conducteur central, et celui-ci est alors introduit par la fente de la couronne du premier câble et soudé à l'âme de ce dernier.

On isole au caoutchouc le conducteur central rapporté, puis on enroule et soude entre elles les deux couronnes.

Le point de jonction reçoit ensuite une ou plusieurs couches protectrices.

Arrêt des conducteurs. — A ses extrémités la ligne est fixée à des isolateurs d'arrêt, et de distance en distance, un fil de jonction solidarise le conducteur et l'isolateur qui le supporte. On évite ainsi, qu'en cas de rupture, le fil de ligne ne glisse sur toute sa longueur.

La ligature du conducteur à l'isolateur se fait avec un fil métallique de même nature que lui, ou une cordelette tressée avec du fil souple. Il va de soi que le diamètre du fil de ligature doit être en rapport avec celui du fil de ligne.

Arrêts aux extrémités. — Si le diamètre du fil de ligne est faible, on peut enrouler ce dernier autour de la tête de l'isolateur, et tordre son extrémité sur la ligne ou la ligaturer avec un fil spécial.

Dans le cas contraire, on fixe l'extrémité du fil ou du câble à un *isolateur d'arrêt* monté sur une embase métallique résistante.

Généralement cet isolateur a la forme d'une poulie à gorge sur laquelle passe le conducteur qui, replié sur lui-même, pourra être ligaturé facilement.

Le fil de ligature doit avoir au moins 1,5 millimètre de diamètre pour un fil de ligne de moins de 4 milli-

mètres ; on mettra 2 fils de ligature pour un conducteur de moins de 8 millimètres de diamètre, et au dessus de 8 millimètres on utilisera la cordelette.

Tendeurs. — Le fil de ligne doit être tendu au fur et à mesure qu'on le place sur les isolateurs successifs ; la *ceinture étau* représentée ci-dessous permet de le faire très aisément, tout en laissant au monteur la liberté de ses deux mains pour opérer une ligature.

Une ceinture en cuir très fort est enfilée dans deux étriers portant l'un un étau à main et l'autre un crochet solide.

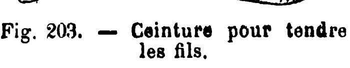


Fig. 203. — Ceinture pour tendre les fils.

On fixe le crochet au poteau à l'aide d'une corde, on pince le fil dans l'étau et l'on serre la ceinture. Quand la tension est suffisante on boucle la ceinture et on peut tout à son aise ligaturer le fil sur la tête de l'isolateur ou faire toute autre manœuvre nécessaire.

Usure des conducteurs par frottement. — Les oscillations du fil de ligne déterminent un frottement sur l'isolateur, frottement que la poussière déposée dans la gorge de l'isolateur rend très nuisible.

On peut éviter en partie cet inconvénient en augmentant le nombre des points d'attache de la ligne aux isolateurs ; mais toutefois si l'on multiplie ces points d'attache on tombe dans un autre ordre de difficultés.

CHAPITRE XV

PHOTOMÉTRIE

LES FOYERS LUMINEUX

Les foyers lumineux sont des appareils qui impriment à l'éther un mouvement vibratoire, qui se traduit sur la rétine par l'impression de *lumière*.

Si l'appareil émet des radiations blanches, c'est qu'il produit simultanément les sept radiations simples du spectre solaire, radiations caractérisées par la longueur d'onde de leur mouvement vibratoire.

PÉRIODE DU MOUVEMENT LUMINEUX VIBRATOIRE

Couleur	Nombre de vibrations en trillions par seconde	Longueur d'onde en millième de millimètre
Rouge.	480	0,620
Orangé	511	0,583
Jaune	540	0,551
Vert	583	0,512
Bleu	628	0,475
Indigo.	663	0,449
Violet.	704	0,423

Il peut n'émettre que des radiations d'une seule espèce s'il est monochrome, ou des radiations constituées par la superposition de deux ou plusieurs radiations élémentaires ; ce dernier cas, celui de lumière colorée, est le plus général.

La lumière de la lampe à arc a une composition différente de celle du gaz et ces deux lumières diffèrent de celle de la lampe à incandescence.

La lumière résultant d'un mouvement vibratoire, on s'explique que sa permanence ne pourra exister qu'autant que l'on entretiendra l'énergie dépensée par le foyer lumineux, comme on ne peut entretenir les vibrations d'un diapason qu'en dépensant une certaine somme d'énergie.

De là, la notion de comparaison entre la puissance lumineuse d'un foyer et l'énergie dépensée, et l'évaluation de la première quantité, en unités de la seconde.

C'est ainsi que l'on trouve que la production d'une intensité lumineuse d'une *bougie* exige :

Avec	la bougie stéarique.	une dépense de	86	watts.
—	la lampe à huile	—	57	—
—	— pétrole	—	42,8	—
—	bec de gaz papillon. . . .	—	93,2	—
—	— Argand.	—	68,8	—
—	brûleur Siemens à récupération	—	45,6	—
—	lampe à incandescence . . .	—	3,5	—
—	lampe à arc	—	0,8	—

La production d'une bougie avec la lumière électrique exige donc une dépense d'énergie moindre qu'avec les autres systèmes ; si ce n'était le coût plus élevé de la production de l'énergie électrique, cette lumière serait supérieure aux autres sous tous les rapports.

On traduit cet état en disant que le *rendement* de la lumière électrique est supérieur à celui des foyers d'autre nature, le rendement étant le quotient de l'intensité lumineuse par la somme d'énergie dépensée pendant l'unité de temps.

L'étude des foyers lumineux comporte deux points principaux relatifs, l'un aux propriétés d'un foyer déterminé, l'autre à la comparaison de ce foyer à un autre ou à un foyer étalon.

Cette étude fait l'objet de la photométrie.

PHOTOMÉTRIE

Au point de vue qui nous occupe, la photométrie est l'exposé des méthodes qui permettent d'évaluer le service que rend un foyer lumineux, c'est-à-dire l'effet produit par les radiations qu'il émet.

Cet effet utile a pour nom *Éclairement*, et il se mesure en *Lux* ou *Bougie-mètre.*

Cette dernière dénomination est incorrecte, comme l'a fait remarquer M. Hospitalier, car on pourrait déduire qu'une bougie à 1 mètre produit le même effet que une demi-bougie à 2 mètres.

On comparera donc l'éclairement produit par une source à celui que donne une bougie placée à 1 mètre, le second foyer étant pris comme unité, et l'on admettra que :

2 Lux sont l'éclairement produit par 2 bougies placées à 1 mètre de distance de l'écran.

3 Lux sont l'éclairement produit par 3 bougies placées à 1 mètre de distance.

Un foyer est caractérisé par son *intensité lumineuse*, c'est-à-dire par l'éclairement qu'il produit.

L'on convient de dire que deux sources lumineuses ont une égale intensité quand, placées à la même distance d'un écran, elles produisent le même éclairement.

La notion de distance est indispensable car, ainsi qu'on le démontre :

L'intensité lumineuse d'une source, en un point donné, ou son équivalent, l'éclairement produit sur un écran placé au point considéré, varient en raison inverse du carré de la distance :

$$\frac{I}{I_1} = \frac{d'^2}{d^2}$$

Ainsi,

1 bougie placée à 1 mètre produit un éclairement de 1 lux.

1 bougie placée à 50 centimètres produit un éclairement de 4 lux.

Une bougie placée à 2 mètres produit un éclairement de 1/4 de lux.

La même loi subsiste si l'on compare entre elles deux sources différentes.

Placées à des distances telles qu'elles produisent sur l'écran la même intensité lumineuse, c'est-à-dire le même éclairement on a :

$$e = \frac{n}{d^2} \qquad e = \frac{n'}{d'_2}$$

en désignant l'éclairement par e, les distances à l'écran par d. d', les intensités lumineuses respectives par n. n'.

De la relation ci-dessus on déduit :

$$\frac{n}{d_2} = \frac{n'}{d'_2}$$

Si l'on connait n, en se servant par exemple d'une lampe étalon, on aura n' en calculant :

$$n' = n \frac{d'_2}{d_2}$$

L'étude d'un foyer ou la comparaison de différents foyers entre eux exigent donc l'emploi d'une lampe étalon à laquelle on comparera successivement les foyers à étudier.

Mais, ici, une difficulté se présente. Comment comparer les éclairements produits par des foyers dont la lumière est formée de radiations différentes ? par exemple une lampe rouge et une lampe bleue.

L'œil ne peut pas apprécier les différences d'éclairement par la simple inspection des écrans, tant par suite de la différence de couleur de lumière que par l'inégale sensibilité de l'œil aux différentes radiations du spectre comme le montre le tableau ci-dessous.

Longueur d'onde	Couleur	Sensibilité
0.34		0,003
0,38		0,020
0,40	Violet	0,128
0,45	Bleu	2,70
0,50	Vert	7,58
0,55	Jaune verdâtre	5,38
0,60		0,95
0,65	Rouge	0,07
0,70		0,012
0,75		0,00006
0,76	Rouge très sombre	0,00001

Toutefois, on peut tourner la difficulté en utilisant la loi de Crova d'après laquelle deux sources de couleur

différente produisent des éclairements égaux, quand les éclairements dûs à leurs radiations vertes respectives, de longueur d'onde $\lambda = 0\mu, 582$ le sont aussi : sur le trajet des rayons qui produisent les deux éclairements à comparer on interpose une cuve à faces parallèles de 7 $^m/_m$ d'épaisseur contenant une solution de :

Perchlorure de fer	22gr,321
Chlorure de nickel	27gr,191

dans 100 d'eau.

Cette solution ne laissant passer que des rayons verts, on est ramené à comparer deux éclairements produits par des rayons de même nature.

Étalons de lumière. — La source lumineuse à laquelle doit être comparé le foyer varie d'un pays à l'autre.

En France on emploie la lampe Carcel et la bougie française de l'Étoile à 5 ou 6 au paquet, donnant une flamme de 52 $^m/_m$, la lampe Girond et celle de Methven.

Fig. 204. — Lampe Carcel.

Lampe Carcel. — Elle donne des résultats exacts à 3 °/₀ près, et son intensité lumineuse est égale à un bec Carcel, soit 9,8 bougies décimales, quand elle brûle 42 grammes d'huile de colza à l'heure.

L'huile doit arriver en grande quantité et la mèche, qui doit être changée à chaque mesure nouvelle, doit avoir une hauteur parfaitement déterminée.

On tolère un écart de consommation d'huile de 4 grammes en plus ou en moins, et l'on admet qu'entre ces limites l'intensité lumineuse est proportionnelle à la quantité d'huile brûlée f :

$$I \text{ carcels} = \frac{f}{42}.$$

Les indications de la lampe Carcel ne sont exactes qu'autant que les différents organes de la lampe ont les dimensions suivantes :

Diamètre extérieur du bec	23,5	mm
— du courant d'air intérieur. .	17	—
— du couraut d'air extérieur. .	45,5	—
Hauteur totale du verre	290	—
Distance du coude à la base du verre.	61	—
Diamètre extérieur au niveau du coude.	47	—
— — du verre en haut .	34	—
Épaisseur moyenne du verre	2	—
Hauteur de la flamme.	40	—

Fig. 205. — Constantes de la lampe Carcel étalon.

La Carcel vaut 0,481 unité Violle.

Étalon Giroud. — L'appareil Giroud comprend deux becs, l'un de 1^{mm} de diamètre et l'autre fait d'un bec Argand, brûlant l'un et l'autre du gaz d'éclairage.

Chacun d'eux est monté sur un rhéomètre ayant pour but de maintenir constante la consommation du gaz.

L'appareil est réglé de telle sorte que le bec Argand

ait une intensité lumineuse de 1 Carcel, et le bec de 1 mm une intensité de 0,1 Carcel avec une hauteur de flamme de 67,5 mm.

Les variations de pression du gaz ont bien pour effet de faire varier l'intensité lumineuse de chacune des flammes, mais le rapport de 1/10 de ces deux flammes reste constant.

Dans les conditions normales de fonctionnement, le bec de 1 mm produit une intensité lumineuse que l'on peut déduire de la hauteur de sa flamme, hauteur que l'on mesure à l'aide d'un viseur placé sur le côté.

Fig. 206. — Lampe étalon de Giroud.

Chaque variation h de 1 mm correspond à 0,0022 Carcel, et l'intensité lumineuse est donnée par la relation

$$I \text{ Carcels} = 0,1 + 0,0022\,(h - 67,5).$$

Étalon Methven. — Un bec Argand est alimenté par du gaz d'éclairage carburé à l'essence de pétrole rectifiée; il porte, en avant, un écran dans lequel est découpée une ouverture rectangulaire telle que, si la consommation du foyer est bien de 141, 3 litres à l'heure, l'intensité lumineuse des radiations émises par l'échan-

crure soit de 2 bougies, et celle du bec Argand entier de 16 bougies.

On fait tomber sur l'écran du photomètre les radiations émises par l'échancrure, et les mesures seront précises même si la qualité du gaz fourni par la canalisation n'est pas très constante.

Cette lampe-étalon est très commode et d'un usage courant.

— L'Angleterre a adopté la bougie anglaise ou *candle* de 6 à la livre de 453 grammes, faite de spermaceti, avec une flamme de 44 ^{mm} de longueur et brûlant 7,76 grammes de matière à l'heure. On emploie aussi la lampe au pentane, de Vernon-Harcourt.

En Allemagne, la *Vereinskerze*, bougie de paraffine fondant à 55° C, de 12 au paquet de 1 kg et de 20^{mm} de diamètre avec flamme de 50^{mm} sert d'unité.

Pour les mesures photométriques, on emploie aussi en Allemagne la lampe à l'acétate d'amyle, de Hefner-Alteneck, qui équivaut à peu près à la Vereinskerze.

Le tableau ci-dessous donne la valeur relative de ces divers étalons :

Etalons	Violle	Carcel	Bougie de l'Etoile	Bougie allemande	Bougie anglaise	Lampe Hefner-Alteneck
Violle.	1	2,080	16,1	16,4	18.5	18.9
Carcel	0,481	1	7,75	7,89	8.91	9,08
Bougie de l'Etoile . . .	0,062	0,130	1	1,02	1,15	1,17
» allemande . . .	0.061	0,127	0,984	1	1,13	1,15
» anglaise	0.054	0,112	0,870	0,886	1	1,02
Lampe Hefner-Alteneck .	0.053	0,114	0,853	0,869	0,98	1

Photomètres.

Ces appareils sont construits, les uns pour comparer entre elles deux sources lumineuses ou mesurer *l'intensité* lumineuse d'une source, et les autres pour mesurer *l'éclairement* d'une surface.

Parmi les premiers, nous citerons les photomètres de Rumford, de Bunsen, de Napoli, et parmi les seconds ceux de Mascart et de Weber.

Photomètre Napoli. — On obtient l'égalité des éclairements, non pas en faisant varier la distance des foyers lumineux à l'écran, mais en ne recevant qu'une fraction des radiations émises par la source la plus intense.

Il est formé d'un photomètre de Foucault éclairé par une lampe carcel-étalon et par la source lumineuse à étudier.

Devant une moitié de l'écran se trouve un disque mobile portant à sa circonférence 6 ouvertures égales dont l'angle au centre est de 30° ; la surface des six ouvertures est égale à la moitié de la surface totale de l'anneau dans lequel elles sont découpées.

Ces ouvertures peuvent être masquées en totalité ou en partie par un jeu de volets mobiles que l'observateur manœuvre à l'aide d'un bouton moleté : les six volets se déplacent simultanément et un tambour portant 1800 divisions indique le rapport de la surface libre des ouvertures à leur surface totale.

Une des moitiés de l'écran est éclairée directement par l'une des deux lampes, et l'autre par la lumière que laissent passer les ouvertures du disque mobile. Pour

faire une mesure, les deux lampes étant à leurs place respectives, on fait tourner rapidement le disque découp et l'on manœuvre les obturateurs jusqu'à ce que l'écra apparaisse uniformément éclairé.

On déduira l'intensité lumineuse cherchée x de la rela tion entre les éclairements :

$$x = \mathbf{E} \frac{3\,600}{n} \frac{d^2}{d'^2},$$

où **E** est l'éclairement produit par la lampe étalon, d d' les distances des lampes à l'écran et n le nombre de di visions du tambour indiquant l'ouverture des créneaux

Photomètre de Rumford. — Ce photomètre est form d'un écran vertical en papier ABCD et d'une baguett *MN* cylindrique fixée en avant de l'écran.

Les deux foyers lumineux à comparer sont placés droite et à gauche de la baguette, et de façon à être une même hauteur au-dessus du support de l'appareil.

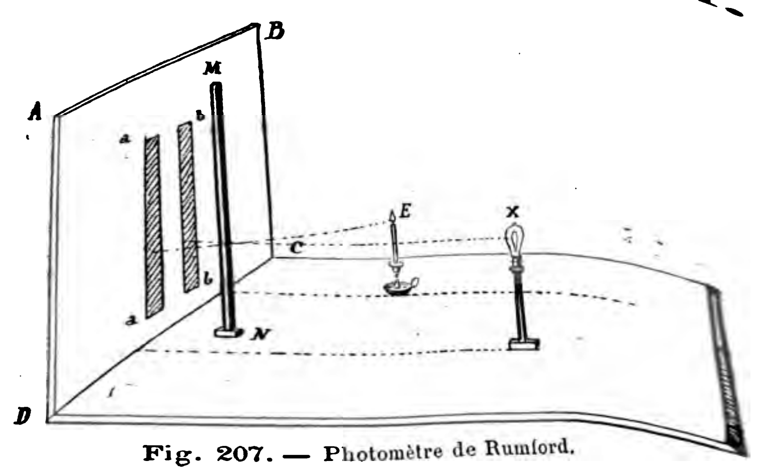


Fig. 207. — Photomètre de Rumford.

On dispose les choses de telle sorte que les deux ombres *aa*, *bb* soient très près l'une de l'autre ; la lampe-étalon **E** étant placée à une unité de distance de l'écran, on déplace le foyer L à étudier jusqu'à ce que les deux ombres portées par la baguette soient égales.

A ce moment les éclairements produits par les deux sources sont égaux, et l'on en déduit :

$$\frac{I}{I'} = \frac{d'^2}{d^2}$$

$$I' = \frac{Id^2}{d'^2}.$$

Pour connaître I' il suffit de mesurer d et d', distances des deux lampes à l'écran.

Si la lampe étalon a une intensité égale à 1 unité et qu'elle ait été placée à 1 unité de distance de l'écran, on aura :

$$I' = \frac{1}{d'^2}.$$

Photomètre de Bunsen. — Cet appareil est très employé en Allemagne et même en France, et il est basé sur ce principe qu'une tache d'huile sur une feuille de papier apparaît blanche par transparence et noire par réflexion : on obtient une tache circulaire bien nette sur l'écran en appliquant à chaud un disque métallique enduit de paraffine.

Si l'écran qui porte la tache est placé entre deux sources lumineuses, la tache sera visible tant que les éclairements produits seront inégaux : il suffit donc de déplacer le foyer à étudier jusqu'à rendre invisible la tache grasse, et de la connaissance des distances à l'écran de la lampe-étalon et du second foyer on déduira facile-

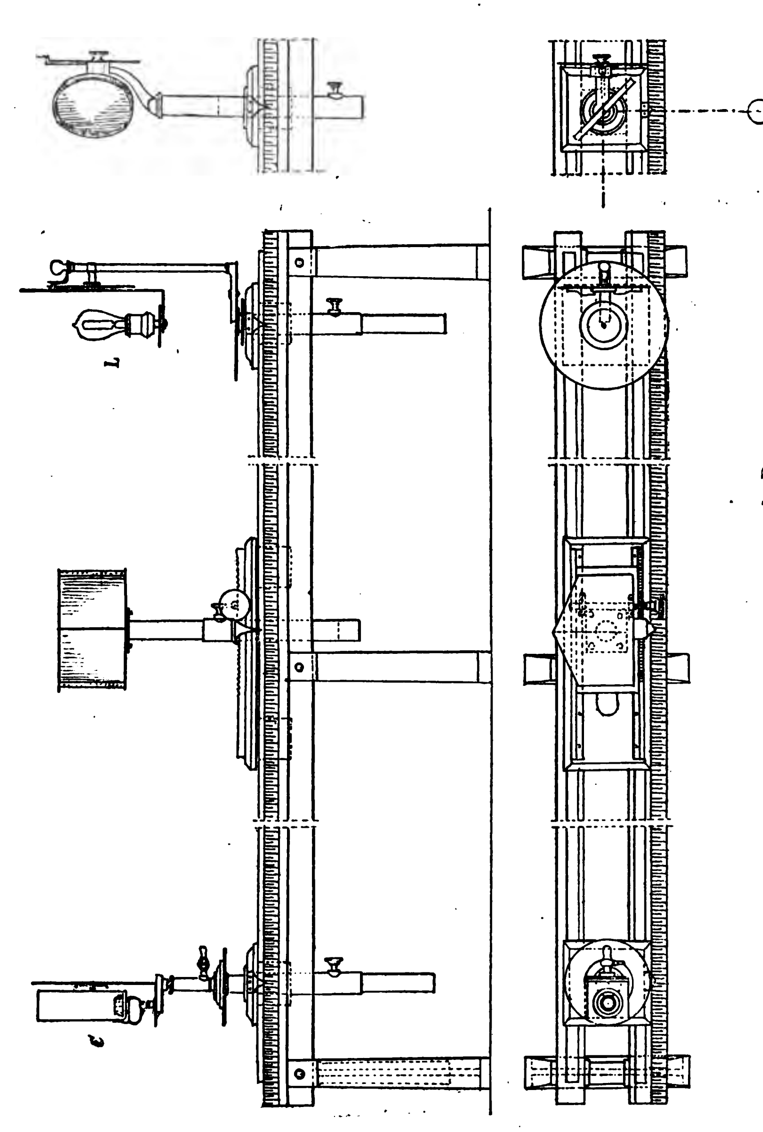


Fig. 208. — Photomètre de Bunsen.

ment l'intensité lumineuse de ce dernier. On aura en effet :

$$\frac{I}{I'} = \frac{d'^2}{d^2}$$

$$I' = \frac{Id^2}{d'^2}.$$

La Fig. 208 représente un photomètre de Bunsen monté pour l'étude d'une lampe à incandescence L dont on compare l'intensité lumineuse à celle d'une lampe-étalon C.

L'écran est placé dans le plan bissecteur de deux miroirs afin de permettre à l'observateur de voir simultanément les deux faces de la tache d'huile.

Photomètre Mascart. — Cet appareil se construit suivant deux modèles :

Le *petit modèle* se tient à la main et permet de faire des mesures comprises entre 6 et 150 *lux.*

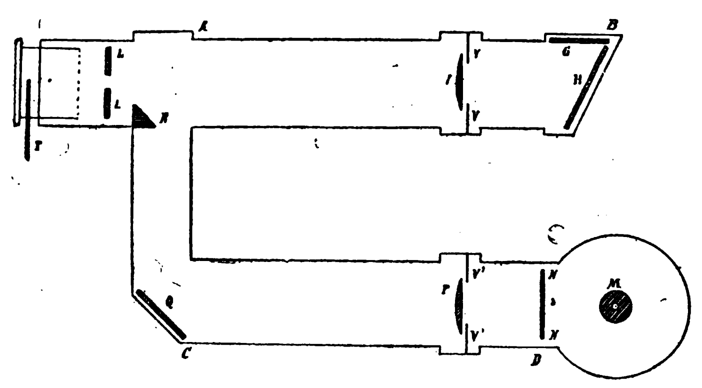


Fig. 209. — Photomètre de Mascart.

Le *grand modèle* monté sur pied sert aux mesures d'éclairements supérieurs 150 lux.

C'est ce dernier que nous décrirons de préférence. Il est formé de deux tubes AB, CD et d'un troisième tube oculaire EF.

Le tube AB reçoit les radiations de la surface à étudier, radiations qui après être tombées sur un écran G sont réfléchies par le miroir H et, par la lentille I, envoyées dans l'oculaire J après avoir traversé le diaphragme L.

Le tube CD contient en M la lampe étalon dont les radiations, après avoir traversé l'écran N semblable à G, sont renvoyées par la lentille P sur le miroir Q ; après réflexion totale dans le prisme R elles arrivent dans l'oculaire au travers du diaphragme L.

Celui-ci est muni d'un verre dépoli avec ouverture centrale. Ce disque de verre est éclairé par les deux sources lumineuses, et l'œil distingue au travers de l'oculaire les éclairements produits.

On amène ces deux éclairements à l'égalité en masquant une partie plus ou moins grande des lentilles I ou P, à l'aide de volets mobiles V, V′ dont le déplacement est mesuré sur une règle graduée.

A l'aide d'une table, on déduit du rapport des déplacements des volets la valeur en *lux* de l'éclairement de la surface étudiée.

Un disque T mobile autour d'un axe, comme les diaphragmes des appareils photographiques, porte une ouverture libre et d'autres munies de verres colorés que l'on peut amener devant l'oculaire.

Il y a lieu d'étalonner l'appareil avec une lampe Carcel placée à 1 mètre chaque fois que l'on change le papier des écrans.

— Dans le petit modèle, les volets des lentilles sont

remplacés par des diaphragmes percés de trous dont les surfaces sont entre elles comme les nombres 1, $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_5$.

Photomètre Weber. — Il est formé d'un tube AB horizontal de 30 cm de long sur 8 de diamètre et d'un tube CD mobile dans un plan perpendiculaire à AB ; un cercle divisé indique l'inclinaison du tube CD sur l'horizontale.

La lampe-étalon L est montée à l'extrémité libre de AB ; elle éclaire un disque en opale E monté sur un cadre que l'on peut déplacer suivant AB au moyen de la vis V. Une règle graduée FG et un vernier H, entraînés par le châssis, permettent d'évaluer très exactement la distance du disque E à la lampe-étalon (Fig. 210).

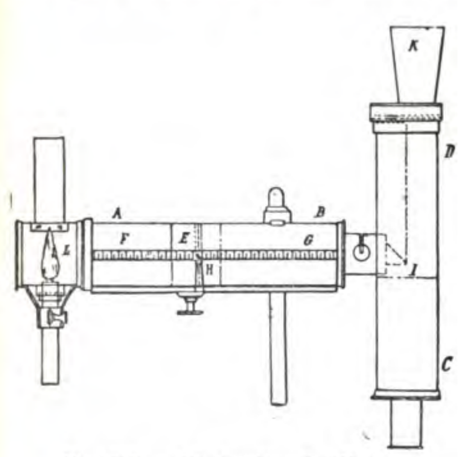


Fig. 210. — Photomètre de Weber.

Le tube CD porte un écran I et un prisme P à réflexion totale qui tourne en même temps que lui. Ce prisme a pour objet de refléchir sur une moitié de l'écran I les radiations issues de l'écran opalin E. L'autre moitié de l'écran est éclairée par la surface à étudier, dont les radiations passent par l'entonnoir K de façon à ne pas se mélanger aux rayons émis par la lampe-étalon.

S'il y a lieu de réduire l'intensité des radiations de la

surface extérieure, on place en g des lames diversement colorées.

Pour effectuer une mesure, on dirige le tube CD sur la surface dont on veut mesurer l'éclairement et on déplace E jusqu'à ce que les deux moitiés de l'écran I paraissent également éclairées au travers de l'oculaire O. On note la distance d de E à la lampe.

On répète l'expérience en dirigeant CD sur une surface d'éclairement connu **E**, c'est-à-dire éclairée par une source d'intensité déterminée placée à une distance également connue ; on note la nouvelle distance d' de E à la lampe.

On aura :

$$\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{E}'} = \frac{d'^2}{d^2}$$

$$\mathbf{E}' = \frac{\mathbf{E}d^2}{d'^2}$$

E′ désignant l'*éclairement* cherché.

Si, comme nous l'avons supposé, on connaît l'éclairement de la première surface, on aura de suite la valeur de l'éclairement de la seconde, sinon, on aura seulement le *rapport* des éclairements des deux surfaces.

Nota. — Si le foyer dont l'intensité doit être mesurée est très puissant comparativement à la lampe-étalon, il y a lieu de prendre certaines précautions si l'on ne veut être induit en erreur par les indications du photomètre.

On démontre, et l'expérience le prouve, que les indications du photomètre ne sont exactes qu'autant que le rapport des intensités de la lampe-étalon et du foyer à étudier ne dépasse pas une certaine limite ; s'il en était autrement, il faudrait substituer à la lampe-étalon une

autre lampe moins puissante, préalablement étalonnée, ou intercaler une lentille divergente sur le trajet des rayons lumineux qui vont du foyer à l'écran.

Mesure du flux lumineux par le lumen-mètre de M. Blondel. — Les photomètres mesurent l'intensité lumineuse d'un foyer dans une direction déterminée et point le flux total; cependant ce dernier élément est indispensable à connaître si l'on veut établir le rendement de la source.

Le lumen-mètre Blondel permet de mesurer le flux lumineux d'une source avec une grande exactitude. Voici d'après la communication faite à la Société Internationale des Electriciens par M. J. Rey, ingénieur chez MM. Sautter Harlé et Cie, constructeurs de l'appareil, la description du lumen-mètre et les résultats d'expériences auxquels il a conduit.

Principe du lumen-mètre. — La méthode imaginée par M. A. Blondel est basée sur la propriété des écrans diffuseurs. On sait que certaines substances : le papier, le verre opale de plus de 2^{mm}, le verre dépoli jouissent de la propriété de diffuser soit par réflexion, soit par transmission, les rayons qu'ils ont reçus sur une face d'une manière indépendante de l'angle d'incidence.

Pour préciser, si l'on appelle (Fig. 211) α l'angle d'incidence des rayons tombant sur l'écran diffuseur AB, β l'angle de diffusion par réflexion, β' l'angle de diffusion par transmission, l'intensité émise dans les directions *bd* ou *bd'* est fonction seulement des angles β ou β' et de l'éclairement de la surface diffusante au point considéré, sans que l'angle α intervienne.

L'expérience montre, en outre, que la valeur de l'intensité réfléchie ou transmise varie peu tant que l'angle

β ne dépasse pas quelques degrés. C'est ainsi qu'avec le papier, si l'on s'arrange de manière que β soit égal

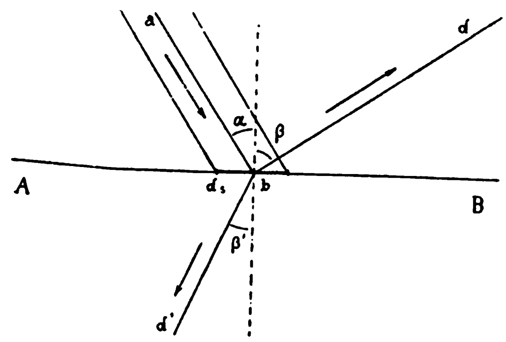


Fig. 211. — Principe du lumen-mètre.

à 4°, l'erreur commise, en supposant cette intensité indépendante de l'angle, sera inférieure à 1 °/₀.

Si l'on désigne par $d\Phi$ la portion du flux que reçoit l'élément ds, l'éclairement au point b est $\frac{d\Phi}{ds}$, l'intensité lumineuse transmise par l'écran est donc

$$k \frac{d\Phi}{ds} \times ds = k d\Phi,$$

en appelant k un coefficient qui dépend des conditions de l'expérience. Pour toute la plage éclairée de l'écran l'intensité totale est $k\Phi$; elle peut donc servir à la mesure du flux Φ.

Ceci posé, M. Blondel a eu l'idée de recueillir le flux total de la source ou une portion bien définie de ce flux et de le projeter sur un écran diffuseur en le rassemblant pour former une tache lumineuse suffisamment dense.

Cette tache est ensuite prise comme source lumi-

neuse secondaire et photométrée à l'aide d'un photomètre ordinaire.

La seule condition à remplir est que le photomètre puisse être placé à une distance suffisante pour que l'angle de sortie des rayons diffusés qui lui parviennent reste faible. En conservant la limite de 4° pour cet angle, il suffit que le photomètre soit à une distance de l'écran égale à huit fois environ le diamètre de la tache lumineuse, condition convenable pour la pratique.

Description et mode d'emploi. — L'appareil, auquel M. Blondel a donné le nom de *lumen-mètre*, est composé d'une sphère métallique S (Fig.212), au centre de laquelle on place le centre O géométrique de la source à

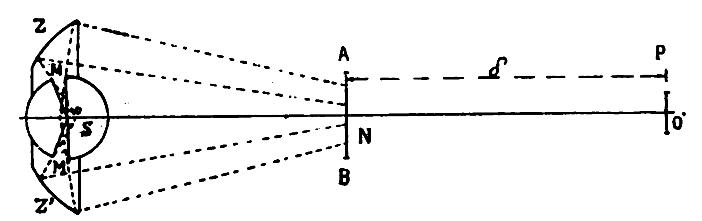


Fig. 212. — Schéma du lumen-mètre.

essayer. Ce centre est toujours facile à déterminer, s'il s'agit d'une source ayant un axe de révolution comme les bougies, les becs ronds à l'huile ou au gaz, l'arc continu ou alternatif.

Si l'on veut mesurer un bec à mèche plate, un brûleur allongé ou une lampe à incandescence, la pratique indiquera très vite quel est le véritable centre. Pour les sources enveloppées par un globe, il est toujours facile d'en déterminer le centre.

La sphère est coupée dans deux directions opposées,

suivant deux fuseaux de 18° chacun qui la séparent en deux parties.

Dans le premier lumen-mètre de M. Blondel, construit en 1892, les rayons qui traversaient les deux fuseaux venaient se réfléchir sur un miroir métallique en cuivre argenté. Ce procédé manquait de précision. Aussi, dans l'appareil définitif, construit en 1895 par MM. Sautter, Harlé et Cie, les rayons qui traversent ces deux fuseaux viennent-ils se réfléchir sur un miroir elliptique ZZ, en verre taillé et argenté, formant une zône ellipsoïdale de révolution autour de l'axe horizontal OO′, ayant pour foyers le centre de la sphère creuse et un point N situé à 3 mètres de distance sur l'axe OO′.

La construction du miroir ellipsoïde n'est pas sans avoir présenté de grandes difficultés qui n'ont été vaincues par MM. Sautter, Harlé et Cie qu'à l'aide de procédés spéciaux que leur expérience dans la construction optique leur a permis de réaliser.

Si l'on place au point N, normalement à cet axe, l'écran diffuseur, les rayons réfléchis par le miroir ZZ viendront y converger en formant une tache de dimension variable avec le diamètre de la source lumineuse essayée.

Dans le modèle nouveau, cette tache présente de 0,20 m à 0,50 m de diamètre suivant l'intensité du courant de la lampe à arc essayée, le diamètre du bec à l'huile ou celui du filament d'une lampe à incandescence.

Il suffit alors de placer le photomètre P à une distance qui varie de 2 à 5 mètres pour mesurer sans difficulté l'intensité de la tache agissant comme source secondaire.

La plupart des sources employées étant symétriques

autour d'un axe de révolution, une seule mesure suffit en général pour faire connaître le flux total qui est égal au flux mesuré multiplié par le facteur 10, les fuseaux ouverts étant chacun de 18°, soit, pour les deux, $\frac{1}{10}$ de la sphère S.

Toutefois, pour l'arc alternatif notamment dont la symétrie est souvent altérée par le passage du courant dans la tige des porte-charbons et pour d'autres sources non symétriques, rien n'est plus facile que de les faire tourner autour de leur axe, et de figurer et d'évaluer le flux dans les divers plans méridiens en sommant les résultats. Disons enfin que la distance de l'écran par rapport au lumen-mètre peut être quelconque. On s'arrange de manière que la tache ait un faible diamètre pour n'avoir pas à trop écarter le photomètre. En réalité, puisque c'est un flux qu'on mesure, si la tache est étalée, l'éclairement par unité de surface sera moindre, mais le résultat restera le même que si elle était concentrée avec un éclairement plus fort.

La Fig. 213 représente l'appareil tel qu'il est construit, la lampe à arc soumise à l'expérience étant placée au foyer. Ce lumen-mètre est monté sur deux tourillons qui permettent de varier son inclinaison. La sphère creuse est accompagnée de deux écrans, qui peuvent masquer à volonté l'hémisphère supérieur des fuseaux MM, pour limiter la mesure aux flux au-dessous de l'horizon, le seul que l'on utilise dans l'éclairage public. Comme on le voit, outre le lumen-mètre, le matériel nécessaire à ces mesures se réduit à fort peu de chose : un simple écran en papier et un photomètre quelconque suffisent.

Pour faire les mesures, on déplace seulement l'éta-

lon I, la distance δ du photomètre à l'écran AB restant constante ; soit l la distance de l'étalon au photomètre.

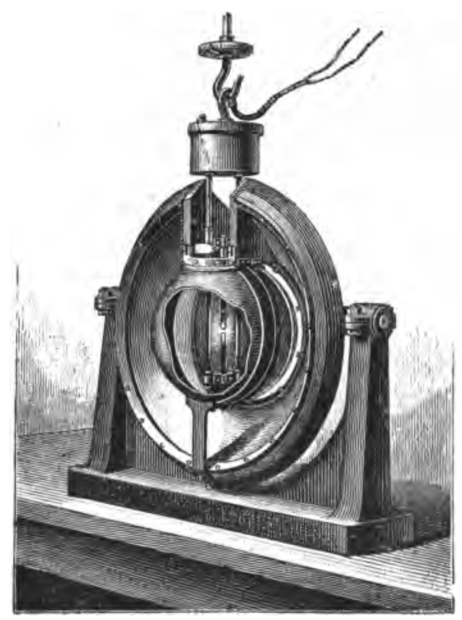


Fig. 213. — Lumen-mètre.

D'après ce qui précède on a donc :

$$\frac{k\varphi}{\delta^2} = \frac{I}{l^2} \quad \text{ou} \quad \varphi = \frac{\delta^2}{k}\frac{I}{l^2} = \frac{KI}{l^2},$$

d'où l'on déduit le flux total de la source.

Pour traduire les mesures en unités absolues, il devient nécessaire de tarer l'appareil. On peut employer dans ce but deux procédés. On place dans l'intérieur

de l'appareil une lampe à huile minérale, d'intensité horizontale connue et limitée, et sur la sphère creuse un angle solide de petite dimension dont le centre est dans le plan horizontal du brûleur. Dans ces limites le flux traversant cet angle solide peut être considéré comme homogène, c'est-à-dire proportionnel à l'intensité.

On peut donc le calculer, connaissant le rapport de l'angle solide mesuré à l'angle solide unité.

Supposons que la lampe employée fournisse une intensité horizontale de 2 carcels ou 19,24 pyrs. Une source ponctuelle équivalente émettrait, par définition, dans un angle solide unité, un flux uniforme 19,24 lumens. L'angle solide intercepté représentant 0,154 de l'angle unité, le flux projeté sur le miroir serait de

$$19{,}24 \times 0{,}154 \doteq 2{,}96 \text{ lumens.}$$

On a trouvé ainsi qu'un flux de 1 lumen était représenté par une tache donnant au photomètre 0,0028 c.

Ce résultat a été confirmé par une opération semblable sur une lampe à arc, dont on avait limité le flux projeté dans un petit angle solide. L'intensité de l'arc étant mesurée préalablement dans la direction du centre de l'angle solide, on en a déduit, comme précédemment la valeur du flux projeté, et l'on a trouvé que le flux de 1 lumen était représenté par 0,003 c, nombre tout à fait concordant avec le précédent.

L'appareil ainsi étalonné dans les conditions mêmes des expériences, puisque le rendement propre du miroir se trouvait éliminé, on a pu traduire en unités absolues les diverses mesures faites.

Le tableau suivant donne le résultat d'une première

série d'expériences de M. Rey sur une lampe à arc, système Sautter, Harlé et Cie, pour divers courants et divers diamètres de charbons.

FLUX TOTAL EN LUMENS

Ampères	Volts	Diamètre des charbons en mm		
		$\frac{21}{13}$	$\frac{18}{12}$	$\frac{14}{8}$
		Lumens	Lumens	Lumens
4	43	»	»	1 660
6	43	1 000	»	»
8	43	»	3 300	»
10	43	6 660	»	»
12	44	»	5 660	»
20	44	7 900	»	21 330
25	44	9 430	»	33 830
30	45	16 260	»	46 330
35	46	23 100	»	61 330

Les mesures jusqu'à 20 ampères n'ont pas été suffisamment contrôlées, elles sont sujettes à révision, et nous ne les donnons qu'à titre provisoire. Au-delà elles sont exactes.

Ces chiffres font ressortir l'influence considérable de la diminution du diamètre. Avec les crayons de $\frac{21}{23}$, le cratère se creuse, et une grande partie du flux est masquée par la pointe du négatif. Si l'on descend aux diamètres de $\frac{14}{8}$ pour les mêmes intensités, non seulement le cratère devient plan, complètement dégagé, mais la surface incandescente s'étend sur la partie tronconique qui entoure l'extrémité.

Le crayon, très poussé, rougit, il est vrai, sur 15 ou 20 millimètres; mais le flux disponible est plus que doublé. Il va sans dire que l'usure croît en proportion, et que la durée de l'éclairage est moindre.

Les Fig. 214 et 215 reproduisent les photographies des taches lumineuses obtenues avec des crayons de $\frac{18}{12}$ pour 5 ampères et pour 30 ampères. L'étendue de la tache est proportionnelle à l'augmentation du flux total.

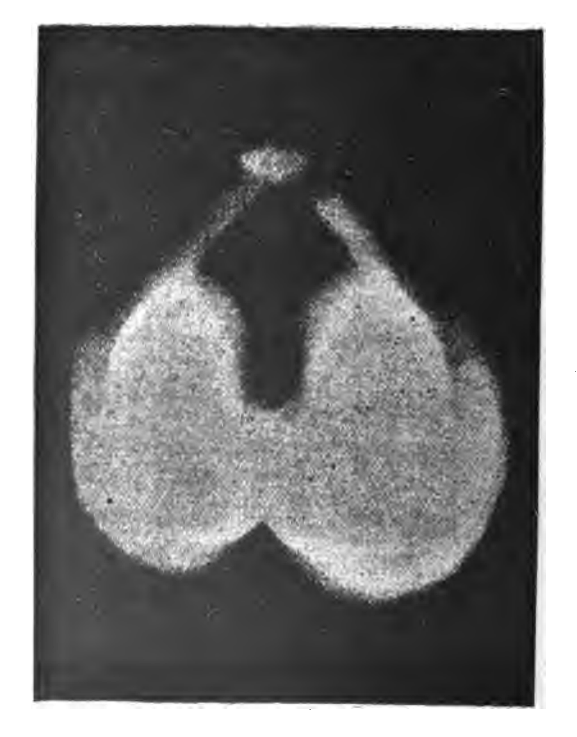


Fig. 214.

On voit combien, dans la pratique, l'ingénieur chargé d'un éclairage aura à se préoccuper de l'importance à donner, suivant les cas, soit à la question de rende-

ment lumineux, soit à celle de l'usure et des frais de remplacement des charbons.

Les figures 216 et 217 représentent l'une la courbe d'intensité en pyrs et l'autre la courbe de flux en lumens d'une lampe à arc de 7,5 ampères.



Fig. 215.

Eclat des différents foyers. — De nombreuses mesures ont permis d'établir que 1 centimètre carré de flamme développe une intensité lumineuse de :

0,06 bougie	dans un bec bougie à gaz.		
0,30	—	—	bec Argand.
0,60	—	—	Siemens intensif.
30	—	—	lampe électrique à incandescence.
480	—	—	lampe — à arc.
24000	—	—	la lumière solaire.

Courbes photométriques. — La courbe photométrique d'un foyer représente l'intensité lumineuse des radiations dans les différentes directions d'un même plan (Fig. 218 et 219).

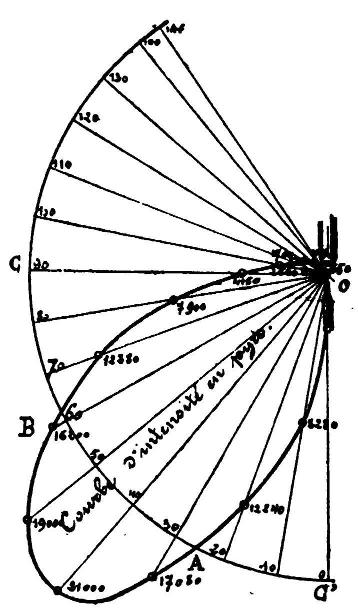


Fig. 216. — Courbe d'intensité d'une lampe à arc de 7,5 ampères.

Lampes à arc. — L'arc étant symétrique autour d'un axe vertical passant par les charbons de la lampe, il suffira de mesurer l'intensité autour de l'axe, dans les différentes directions d'un plan passant par les crayons (Fig. 218 et 219).

Les globes dont on entoure les foyers exercent une influence sur la courbe photométrique qu'ils modifient d'autant plus profondément qu'ils sont faits d'un verre plus opaque, comme le montrent les figures 220, 221 et 222.

Intensité moyenne sphérique. — La comparaison

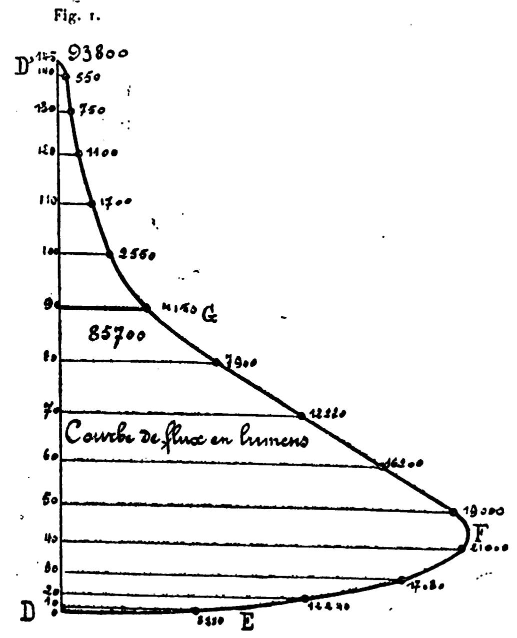


Fig. 217. — Courbe de flux en lumens d'un arc de 7,5 ampères.

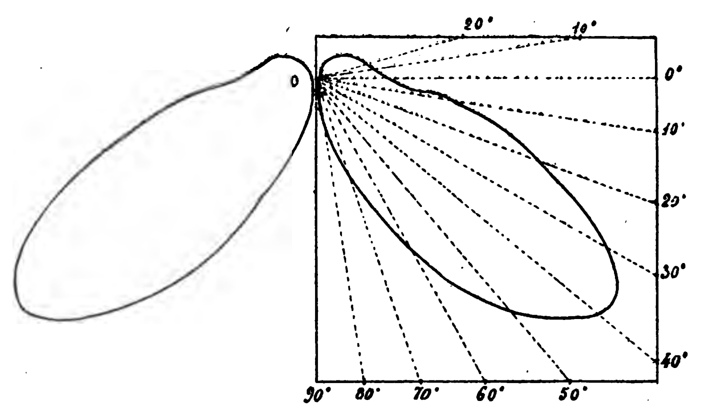


Fig. 218. — Courbe photométrique d'un arc à courant continu.

exacte des effets produits par deux foyers lumineux ne peut se déduire que de celle de l'éclairement moyen produit par chacun d'eux sur la surface d'une sphère concentrique de rayon égal à une unité.

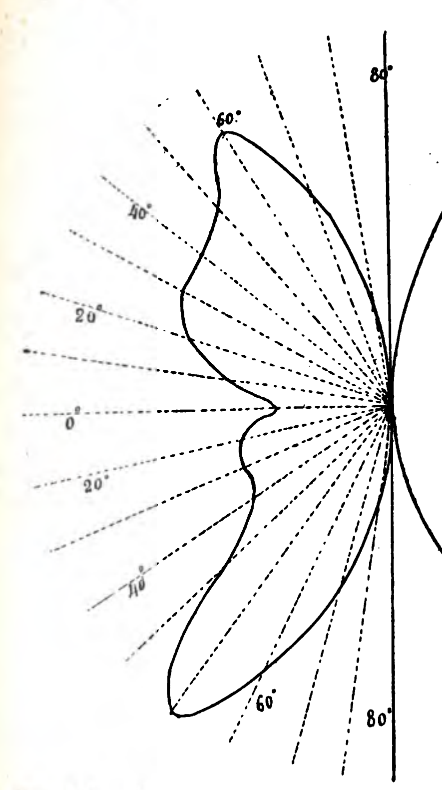


Fig. 219. — Courbe photométrique d'un arc à courants alternatifs.

Si le foyer est symétrique par rapport à un axe vertical, il suffit de tracer les courbes des intensités lumineuses dans toutes les directions d'un même azimuth, puis, après avoir divisé la sphère en zones très étroites, de multiplier chacune de ces surfaces par l'intensité correspondante et de faire la somme de ces produits.

Le résultat est l'intensité moyenne sphérique.

Dans le cas des lampes à arc, l'expérience a prouvé que:

$$I_{ms} = \frac{I_h}{2} + \frac{I_{max}}{4}$$

I_{ms} désignant l'intensité moyenne sphérique, I_h l'intensité horizontale et I_{max} l'intensité maxima.

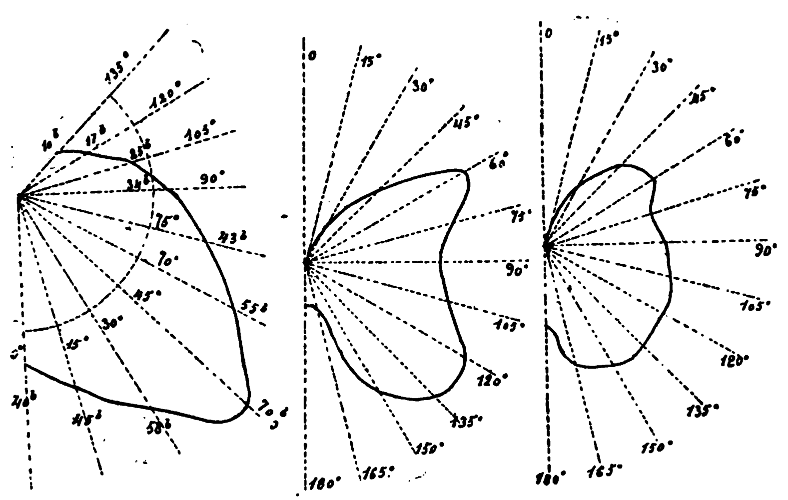


Fig. 220. — Courbe photométrique d'un arc à courant continu muni d'un globe en opaline.

Fig. 221. — Courbe photométrique d'un arc à courants alternatifs muni d'un globe en opaline.

Fig. 222. — Courbe photométrique d'un arc à courants alternatifs muni d'un lobe en opale.

L'intensité moyenne de l'hémisphère supérieur est assez bien représentée par :

$$i = \frac{I_h}{4}$$

et celle de l'hémisphère inférieure par :

$$i_1 = \frac{I_h + I_{max}}{4}.$$

Si l'on connaît la courbe photométrique d'un foyer, il est très facile d'en évaluer par la méthode graphique l'intensité moyenne sphérique (Fig. 223).

On décrit un demi-cercle O et, par l'extrémité de chaque rayon, on mène une horizontale sur laquelle on

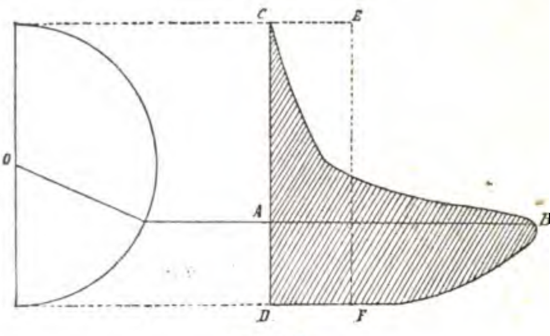


Fig. 223.

prend à partir de la verticale CD une longueur AB égale à l'intensité mesurée sur la courbe photométrique suivant le rayon correspondant. On réunit par un trait tous les points B et à l'aide d'un planimètre on mesure la surface délimitée par la verticale CD et la courbe.

On construit ensuite sur CD un rectangle CDEF de même surface que l'aire délimitée par la courbe CDB : le côté CE du rectangle mesure l'intensité moyenne sphérique du foyer.

Lampe à incandescence. — La lampe à incandescence étant dissymétrique, il y aura lieu de dresser 3 courbes photométriques, l'une pour l'intensité dans le plan horizontal, la seconde pour l'intensité dans le plan vertical contenant le filament et la troisième pour l'intensité dans un plan vertical perpendiculaire à celui du filament.

L'examen des courbes 224, 225, 226, montre que l'intensité varie peu dans le plan horizontal, et qu'il en

est tout autrement dans les différentes directions d'un azimuth.

Il y a donc tout lieu d'admettre, que l'intensité moyenne sphérique, la seule à considérer, est très différente de l'une des valeurs de l'intensité dans un plan vertical ou horizontal.

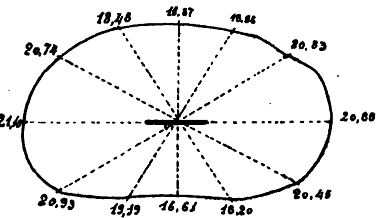


Fig. 224. — Courbe de l'intensité lumineuse d'une lampe Edison dans les différentes directions du plan horizontal. Le filament est projeté au milieu.

On pourra calculer l'intensité moyenne sphérique par la formule :

$$\mathbf{I}_{ms} = C'\mathbf{I}_{hm},$$

l'intensité moyenne horizontale, étant elle-même déterminée par la relation :

$$\mathbf{I}_{hm} = C_0\mathbf{I}_0$$

$$C_1\mathbf{I}_{45^0} = C_2\mathbf{I}_{90^0}$$

Fig. 225. — Courbe de l'intensité lumineuse d'une lampe Edison dans les diverses directions du plan du filament *f*.

et les coefficients C_0 C_1 C_2 C' valant respectivement :

C_0	de	0,88	à 1,09
C_1	—	0,74	à 0,98
C_2	—	0,90	à 1.26
C'	—	0,88	à 0,91

L'application des formules ci-dessus montre, comme l'expérience le prouve du reste, qu'une lampe dite de 16

bougies a une intensité moyenne sphérique de 12 bougies.

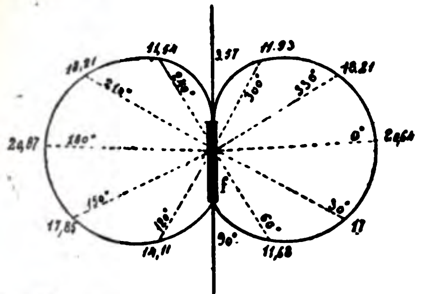


Fig. 226. — Courbe d'intensité lumineuse d'une lampe Edison dans un plan vertical perpendiculaire à celui contenant le filament dont on voit la projection en *f*.

Eclairement. — Nous compléterons ces renseignements par l'indication de la méthode qui permet de calculer l'éclairement approximatif produit en un point par un foyer donné.

— Calculer l'éclairement produit par un foyer F d'intensité lumineuse I, placé à une hauteur h au-dessus du sol sur l'élément de surface AP situé à une distance x du pied du foyer (Fig. 227).

L'élément AP de surface S faisant avec FP un angle $90° - \theta$, la formule :

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{I}}{\mathrm{FP}^2 . S} = \frac{\mathbf{I}}{(h^2 + x^2)S}$$

ne lui est pas applicable.

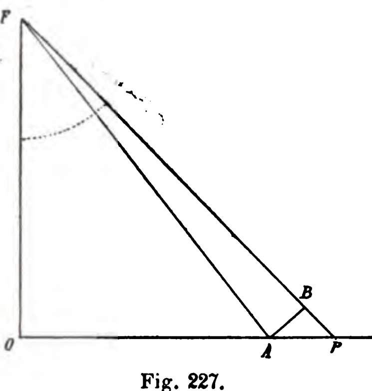


Fig. 227.

Substituons-lui l'élément AB perpendiculaire à FP et de surface S' : l'éclairement en AB est :

$$\mathbf{E}' = \frac{\mathbf{I}}{(h^2 + x^2)S'}.$$

Le même flux lumineux traversant les surfaces AB et AP, les éclairements seront sur chacune d'elles en raison inverse de ces surfaces, et l'on aura :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}' \times \frac{S'}{S} = \frac{\mathbf{I}}{(h^2 + x^2)S'} \times \frac{S'}{S} = \frac{\mathbf{I}}{(h^2 + x^2)S};$$

or

$$\mathrm{AB} = \mathrm{AP} \cos\theta \quad \text{et} \quad S = S' \cos\theta$$

puisque l'on considère des surfaces élémentaires, et

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{I}}{h^2 + x^2} \cos\theta.$$

Cette formule montre que l'éclairement est maximum en O et diminue très rapidement quand x augmente, c'est-à-dire quand on s'éloigne du pied du candélabre.

Si le point P est fixe, l'éclairement sera nul si θ est égal à 0 ou à $\frac{\pi}{2}$, c'est-à-dire quand le foyer est à l'infini ou sur le plan OP : l'éclairement en P passe donc par un maximum qui correspond à une position de F déterminée par la condition :

$$\mathrm{tg}^2\,\theta = 2 \qquad \text{ou} \qquad h = 0{,}707x.$$

La valeur de l'éclairement maximum en P est

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{I}}{x^2} \frac{2}{3\sqrt{3}}.$$

A cette formule, dont la démonstration est hors du cadre de cet ouvrage, nous ajouterons la suivante qui donne la valeur de l'éclairement moyen d'un cercle de rayon x décrit du pied du foyer comme centre :

$$\mathbf{E}_m = \frac{2S}{x^2}\left(1 - \cos \operatorname{arc} \mathrm{tg} \frac{x}{h}\right).$$

Si le point ou la surface considérés sont éclairés par plusieurs foyers, on calculera l'éclairement produit par chaque foyer et l'on fera la somme des éclairements.

— Calculer l'éclairement au point P placé à égale distance de deux foyers lumineux de même intensité **I** et de même hauteur h au-dessus du sol.

Soit d la distance du point P à l'un des foyers, on aura :

$$\mathbf{E} = 2\,\frac{\mathbf{I}\cos\theta}{h^2 + d^2},$$

et, comme

$$\cos\theta = \frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2}},$$

$$\mathbf{E} = 2\,\frac{\mathbf{I}h}{\left(\sqrt{h^2 + d^2}\right)^{\frac{3}{2}}}.$$

Comme précédemment, la valeur de **E** passe par un maximum si l'on fait croître h de 0 à d, et le maximum correspond à :

$$h = 0{,}707d.$$

— Les formules ci-dessus supposent que l'intensité lumineuse du foyer est la même dans toutes les directions et qu'il ne se produit ni diffusion ni réflexion de lumière sur les parois de l'espace éclairé ; ces conditions ne sont presque jamais remplies et les résultats du calcul sont toujours en contradiction avec les mesures photométriques. Néanmoins, la connaissance des formules ci-dessus peut rendre des services et c'est à ce seul titre que nous les avons rappelées.

Le mieux à faire pour déterminer l'intensité du foyer à employer est d'opérer par comparaison avec des exemples connus.

ÉCLAIREMENT A PRODUIRE DANS UNE INSTALLATION

La valeur de l'éclairement à produire dépend de la nature des locaux et de leur destination.

Les chiffres indiqués ci-dessous sont des *moyennes*.

Éclairages privés

Éclairage des appartements.

Salon	de 3 à 5 bougies par mètre cube
Chambres	de 0,5 à 1 — — — —
Bureau	de 1 à 1,5 — — — —
Escalier et vestibule .	de 0,25 à 0,5 — — — —

Lorsque les pièces de l'appartement ont une hauteur moyenne de 2,75 à 3,50 mètres, on peut calculer l'intensité du foyer en appliquant de 1 à 2 bougies par mètre carré de plancher pour un éclairage ordinaire et de 4 à 7 bougies pour un éclairage brillant.

Éclairage des cafés.

De 1,5 à 3 bougies par mètre cube.

Éclairage des théâtres.

Couloirs .	0,5	bougie	par	mètre	cube	
Escaliers .	0,25	—	—	—	—	
Salle. . .	0,5 à 0,75	—	—	—	—	(salle et scène comprises)
Scène . .	20 à 25	—	—	—	—	
» . . .	2 à 3	—	—	—	carré	
Foyer . .	0,5 à 1,5	—	—	—	cube	
» . . .	7 à 10	—	—	—	carré	

Éclairages industriels.

Cours d'usines, de gares, etc., *découvertes* : 0,60 bougie par mètre carré — par lampes à arc de 10 ampères à 6 mètres du sol si l'espace à éclairer est *très grand*, ou par lampes de 6 ampères à 4 mètres du sol dans le cas contraire.

Cours d'usines, de gares *couvertes* : 0,55 bougie par mètre carré — par lampes à arc de 10 ou de 6 ampères placées à 4 mètres du sol.

Chantiers de maçonnerie, scieries, triage de marchandises : 0,6 à 0,8 bougie par mètre carré.

Ateliers de grosse mécanique de 0,75 à 1 bougie par mètre carré.

Un éclairage de 1, 5 bougie par mètre carré est nécessaire dans les ateliers où l'on exécute des travaux délicats.

Certaines industries, formant autant de cas particuliers, nécessitent des modes d'éclairage spéciaux par la division de la lumière ou l'emplacement des lampes. Par exemple il faut :

Dans une filature de fils écrus ou de fils clairs, un arc de 12 ampères par 150 à 180 mètres carré si la salle est haute.

Dans un tissage, avec des étoffes claires, 1 arc de 10 ampères par 60 à 75 mètres carrés.

Dans un tissage, avec des étoffes sombres, 1 arc de 10 ampères par 40 à 50 mètres carrés.

Dans un tissage, avec des étoffes noires, 1 arc de 10 ampères par 30 à 40 mètres carrés.

Dans un tissage, avec des étoffes claires, 1 lampe à incandescence de 10 bougies pour 2 métiers.

Dans un tissage, avec des étoffes sombres, 2 lampes à incandescence par métier.

Nous terminerons en reproduisant le tableau suivant dressé par M. Mascart.

	Dimensions		Total de bougies	Nombre de bougies	
	Plan m^2	Volume m^3		par m^2	par m^3
	Salle des glaces du palais de Versailles				
En 1745	720	9 360	1 800	2,50	0,19
— 1873	—	—	4 000	5,35	0,43
— 1878	—	—	8 000	11,10	0,85
	Salle des fêtes de Compiègne				
En 1888	440	3 520	1 000	2,28	0,28
	Opéra. — Soirées de bal				
Foyer	672	7 392	6 000	8,93	0,81
Salle	400	9 200	11 140	27,85	1,21
Scène	530	8 000	4 720	8,90	0,59
En 1888 :	Hôtel-de-Ville. — Bals				
Salle des fêtes	1 295	24 000	18 720	14,46	0,78
Salle à manger	300	2 460	4 320	14,40	1,75
Salon de verdure	165	1 350	720	4,36	0,53
Grands salons	496	4 067	7 560	15,24	1,86
Galerie latérale	257	3 600	3 600	13,93	0,56
Salon réservé	195	1 350	720	4,36	0,53
	Théâtres				
Odéon	350	5 600	2 470	7,06	0,44
Gaîté	250	4 800	2 360	9,44	0,55
Comédie-Française	240	3 500	2 340	9,75	0,67
Palais-Royal	90	1 000	1 900	21,10	1,90
Porte Saint-Martin	200	3 250	3 200	16,00	0,98
Renaissance	96	1 400	1 970	20,52	1,40

FIN DU PREMIER VOLUME

ERRATA

Pages :	*Lignes :*	*du :*	*Au lieu de :*	*Lire :*
10	7	bas	13	130
12	5	haut	6648	6654
—	13	—	l'eau	le poids de l'eau
13	6	bas	etc.	et la refoule
15	22	haut	à	vers
26	11	—	specimen la	spécimen de machine à allure lente la
—	21	—	compound et triples	compound doubles et triples
29	4	—	180	90
—	7	—	compound ou en triple	compound double ou triple
31	4	bas	champ magnétique	système inducteur
33	3	—	endroits	conduits
34	17	haut	mètres	mètres par seconde
61	9	—	*supprimer* et les figures... *jusqu'à la fin de la phrase*	
62	15	—	fig. 23	Fig. 23 et 24
64	7	—	dans la vitesse	à la vitesse
68	1	—	Travail indiqué	Puissance indiquée
—	[illegible]	—	Travail effectif	Puissance effective
71	2	—	le travail	celle
—	4	bas	de classe	de cette classe

Pages :	Lignes :	du :	Au lieu de :	Lire :
134	12 et 13	haut	*supprimer* en S et en S'	
136	15	—	avec	sur
—	19	—	avec	à
—	3	bas	un	une
—	—	—	magnifique	magnétique
137	1	haut	un	en
—	13	—	plusieurs	tous les
—	14	—	mais d'une	mais de fils de fer ou d'une
—	19	—	celles	ceux
140	20	—	cols lecteur	collecteur
142	16	—	à produire ;	à produire ; mais leur section doit être fonction de l'intensité du courant et de la résistivité du métal employé ;
—	6	bas	pour	par
143	2	haut	Halske et la	et Halske et par la
—	18	—	ment	simplement
144	6	bas	la génératrice	des génératrices
145	3	haut	*Collecteur Siemens Halske*	*Collecteur à air de Siemens et Halske*
150	1	—	, mais ils étaient posés	portant
—	3	—	Bordeaux	Boudreaux
—	11	—	a été faite	leur a été donnée
—	4	bas	permet	permettent
152	20	haut	à boudins	en boudin
154	11	—	les machines... celle	ses machines... celles
—	1	bas	décalage	calage
159	18	haut	bornes	balais

Pages :	*Lignes* :	*du* :	*Au lieu de* :	*Lire* :
160	16	haut	*supprimer* Comme on le voit par la figure ci-dessus	
162	13	—	$\frac{100 + 110}{2} = 105$	$100+100+\frac{10}{2}=205$
—	7	bas	*en dérivation*	*-shunt*
165	17	haut	exister	exciter
—	19	—	*Dynamo en dérivation*	*Dynamos-shunt*
166	7	—	à	avec
—	1	bas	a a_1	a a_1 et d d_1
167	16	haut	fermés (*en fin de phrase*)	ouverts
—	8	bas	force	puissance
168	Fig. 68		*compléter les lettres* :	+ en face de + I — I_1 *b* — *c*
—	4	—	*m*	*a*
169	12	—	ηi	ηi
—	8	—	force	puissance
—	7	—	d'énergie électrique	électrique
170	5	haut	ηi	ηi
—	4	bas	du	de son
172	1	haut	correspondantes	correspondant
—	10	—	paliers	coussinets
178	9	—	celui-ci	le coussinet
181	6	—	*supprimer* donc	
—	8	bas	les	des
185	2	—	du réhostat	dans le réhostat
186	2	haut	en circuit	du circuit
—	5	—	leur valeur normale	leurs valeurs normales
—	11	—	DA	LA
188	3	—	*ajouter* après les avoir déconnectées	
190	8	—	d'énergie	de puissance

Pages :	*Lignes* :	*du* :	*Au lieu de* :	*Lire* :
190	9	haut	chaleur	échauffement
—	12	—	d'énergie transformée en chaleur	de puissance ainsi transformée
—	18	—	le même excès	la même élévation
—	7 à 10	bas	*supprimer les points entre les chiffres*	
192	17	haut	et clavetés	, clavetés
—	—	—	*ajouter à la fin de la phrase* : et perforés dans le voisinage de la périphérie.	
194	5	bas	d'orifices	de trous
200	1	—	un retard sur le rayon d'induction nulle correspondant, plus grand que...; de *a*.	sur le rayon d'induction nulle correspondant un retard plus grand (d'une quantité *a*) que...
201	16	haut	un nombre *q* de fois *a*	*a* un nombre de fois *q*
—	1	bas	$N - 2$	$N \pm 2$
206	1	haut	figure 3	figure 76
—	18	—	*supprimer* : 6	
207	4	—	sur C ou de 120° en avance	ou de 120° en avance sur *c*
208	*Titre du tableau*		Divers types de machines Desroziers	
210	7	bas	axes	sections
211	8	haut	un angle	des angles
215	*Légende de la fig.*		en tambour	en anneau
216	1	haut	On remarquera (fig. 86 et 87)	*Induits en anneau.* — On remarquera (Fig. 86), comme dans la figure 87,
—	9	bas	*supprimer* : (Fig. 85)	
—	3	—	appliquées à plat sur la périphérie	plates, montées sur champ à la péri-

Pages :	*Lignes* :	*du* :	*Au lieu de* :	*Lire* :
			d'un disque,	phérie d'un disque central,
217	12	haut	circuit induit et inducteurs	le circuit induit et les inducteurs
217	13	haut	*ajouter* : qui par sa rotation fait varier la réluctance.	
—	19	—	b	b_1
219	6	bas	à frotteur	à frotteurs bb
221	9	—	foeder	feeder
223	*Légende de la fig.* 92		produites	induites
—	2	bas	sa	la
2:6	8	haut	du premier	de la première
229	7	bas	renflement	ronflement
231	4	—	sources distinctes de force électromotrice	forces électromotrices distinctes
232	2	—	quatre	deux
234	6	haut	trois de	trois
—	3	bas	*Montagne*	*Montage*
236	9	haut	iaison	liaison
239	15	—	de polarité alternativement contraire	se font face par leurs pôles alternativement contraires
—	19	—	fixée sur	actionnée par
244	2	bas	1,3	1 à 3
249	12	haut	249	228
250	10	bas	Une série	Des séries
252	11	haut	couche de d'oxyde	couche d'oxyde
253	11	—	entimoine	antimoine
254	7	—	ou oxyde	en oxyde
259	15	—	On le prépare	*Liquide.* — On le prépare

Pages :	*Lignes :*	*du :*	*Au lieu de :*	*Lire :*
259	22	haut	un écrou à deux têtes	une tige à deux écrous
—	3	bas	fig. 119	Fig. 116
—	2	—	un écrou à deux têtes	une tige à deux écrous
266	12 et 15	haut	p	*f*
268	1	—	réciproquement	respectivement
—	—	—	*i.T'*	*i'*.T'
—	—	—	de la	et la
—	9 et 10	bas	watts	watts-heure
268	6	bas	enregistreur,	enregistreur pendant un temps donné,
—	3	—	donneront	donneront pour le même temps
—	—	—	watts	watts-heure
269	9	haut	où	ou
—	*Tableau*		*(faux)*	(*se reporter au* Formulaire de M. Hospitalier,1895,p.254)
270	6	bas	20 °/₀	10 °/₀
273	5	—	*Défaut d'isolement*	*Vérification d'un défaut d'isolement*
274	8	—	*à l'inactivité*	*en inactivité*
—	3	—	2 | 5	2,5
—	2	—	63	13
—	1	—	6 °/₀	6,5 °/₀
275	7	haut	plus	aussi
276	8	bas	grammes correspondent	grammé correspond
277	2	haut	centimètre	centimètre cube
278			*supprimer les lettres de référence à une figure supprimée*	

Pages :	*Lignes :*	*du :*	*Au lieu de :*	*Lire :*
279	11	haut	volts	volt
—	18	—	75 °/₀	75 °/₀ en énergie
280	18	—	de la batterie	des lampes
—	20	—	aux bornes	jusqu'aux bornes
281	9	—	le travail développé	le travail et la puissance développés
—	17	—	chevaux-vapeur	chevaux-heure
—	19	—	chevaux-vapeur	chevaux-heure
—	22	—	chevaux-vapeur	chevaux-heure
—	1	bas	chevaux	chevaux-heure
282	3	haut	chevaux	chevaux-heure, soit une puissance respective de 7,474, 13,11, et 13,8 chevaux-vapeur pendant 5 heures.
—	8	haut	intensité	intensité normale
—	9	—	35	31
—	12	—	165	170
—	6	bas	plus	autant
—	3	—	—	et
—	1	—	de	des
283	14	haut	$\frac{120}{2} = 60$	$\frac{120}{2,5} = 48$
—	15	—	soit 65	soit 55
—	5	bas	de charge sera	de charge, moitié du courant de décharge, sera
284	1	haut	de ampères	de 25 ampères
—	17	—	chevaux-vapeur	chevaux-heure
—	20	—	100 chevaux	100 chevaux-heure
—	4	bas	un travail	un travail de
—	3	—	chevaux-vapeur	chevaux-heure
285	2	—	éléments	constantes

Pages :	*Lignes :*	*du :*	*Au lieu de :*	*Lire :*
286 à 289			*La première ligne horizontale de chiffres indique uniquement les numéros des colonnes.*	
290	11	haut	mesure, de contrôle	mesures et de contrôle
—	6	bas	celui	celle
292	1	haut	des lampes	n lampes
—	21	—	doit	doivent
294	13	—	sa force électromotrice reste	la différence de potentiel aux bornes des lampes doit rester
295	3	—	122	120
—	9	—	principaux de	principaux et dans
—	7	bas	I	i
—	2	—	en n	en $n - 1$ et en n
296	2	haut	$V'_1 - V_1$	$V'_1 - V'$
—	4	—	$V - V_1$	$V - V'$
—	4	bas	d'ordre à 1.2.	d'ordre 1,2,
—	2	—	$i, i_1, \ldots i_p$	$i_1, i_2, \ldots i_p$
302	2 et 5	haut	e	u
—	17	—	fig. 132	fig. 130
303	2	bas	sur chacune des deux parts	sur chacun des deux ponts
305	11	haut	De même dans le cas du	De même que dans le cas de
306	1, 2, 3	—	E	u
—	17	—	*ajouter* : 2e *Cas.* —	
308	19	—	fig. 136 et 137	fig. 134 et 135
—	1	bas	suivantes ci-dessus	ci-dessus donnent
311	4	haut	permettent	permet
312	16	—	de la charge	de la charge et de la décharge
320	Fig. 146		Montage de lampes à incandescence.	Montage triphasé de lampes à incandes-

Pages :	*Lignes :*	*du :*	*Au lieu de :*	*Lire :*
				cence avec fil de compensation.
320	15	haut	biphasé	diphasé
—	Fig. 147		Montage sur circuit biphasé.	Montage sur circuit diphasé à 4 fils.
—	17	—	est 4 fils	est à 4 fils
—	Fig. 148		Montage sur circuit biphasé.	Montage sur circuit diphasé à 3 fils.
322	11	—	haut voltage	haute tension
349	3	—	1887-1888-15.766.000	1887-1888 15766000
—	2	bas	L'isolement électrique	Le pouvoir isolant
351	12	—	leurs procédés de secrets	de mystère leurs procédés
352	Tableau		*L'accolade doit s'étendre à* « Carton ordinaire »	
353	8	—	résistance	résistivité
357	1	—	j'indiquerai plus loin la nature	la nature est indiquée ci-dessus
358	12	haut	malléabilité	ductilité
358	7	bas	en V	en U
—	6	—	l'un sur l'autre	l'une sur l'autre
360	13	haut	sur	dans
362	4	bas	armature	armure
363	1	—	secondaire	auxiliaire
364	11	haut	polarité	sens
365	10	—	se formant	se fermant
—	6	bas	secondaire	auxiliaire
366	3	haut	secondaire	auxiliaire
—	2	bas	de gaz	de dégagement de gaz
367	4	haut	pour des lampes	des lampes
369	1	—	57	37

Pages :	*Lignes :*	*du :*	*Au lieu de :*	*Lire :*
369	2	bas	on ménage... une cavité	on pratique... une rainure
—	1	—	de diamètre	du diamètre du petit câble
372	11	haut	s'inpose	s'interpose
374	2	bas	prennent	prenaient
375	14	haut	Il faut un courant de 200 ampères... pour que le fil sous plomb produise le même résultat.	Il suffit d'un courant de 200 ampères... pour que le même résultat se produise avec le fil sous plomb.
—	2	bas	25 grammes	25 grammes par kg
—	1	—	*ajouter :* pour la couverture de soie	
376	Ier Tableau		Diamètre....	Diamètre....en mm
—	1	—	le voltage	la tension
377	3	haut	Voltage	Tension
—	—	—	*supprimer :* en millimètres	
380	Fig. 171		Isolateur à gaz	Isolateur à gorge supérieure
381	16	—	à gorge	à gorges
381	19	—	d'une gorge	d'une ou plusieurs gorges (*et la suite en conséquence*)
—	Fig. 173		à gorge	à gorges
383	8	—	et se trouve à un niveau inférieur	et dont l'orifice se trouve à un niveau supérieur
384	Tableau, 1re lig.		542	254
—	Fig. 178		Isolateur Scomburg	Isolateur Schomburg
422	7	haut	sur second	sur ce second
424	11	—	caoutchouc de ruban	caoutchouc et de ruban

Pages :	*Lignes* :	*du* :	*Au lieu de* :	*Lire* :
424	14	bas	sur un	sous un
427	4	haut	appareils	centres
—	7	—	l'appareil	la source lumineuse
—	—	—	qu'il	qu'elle
—	11	—	PÉRIODE	FRÉQUENCE ET PÉRIODE
—	5	bas	Il peut	Elle peut
428	10	haut	la puissance	l'intensité
—	11	—	l'énergie	la puissance mécanique
—	2	bas	la somme d'énergie dépensée pendant l'unité de temps	la puissance dépensée
430	7	—	$\frac{I}{I_1}$	$\frac{\mathbf{I}}{\mathbf{I}_1}$
—	6	bas	$e = \frac{n}{d^2}$ $e = \frac{n'}{d'^2}$	$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{I}}{d^2}$ $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{I}'}{d'^2}$
—	5	—	e	$\mathbf{E}$
—	3	—	$n.n'$	$\mathbf{I},\mathbf{I}'$
—	1	—	$\frac{n}{d_2} = \frac{n'}{d'_2}$	$\frac{\mathbf{I}}{d^2} = \frac{\mathbf{I}}{d'^2}$
431	3	haut	$n' = \frac{d'_2}{d_2} n$	$\mathbf{I}' = \mathbf{I} \frac{d'^2}{d^2}$
432	15 et 14	bas	Carcel et la bougie	Carcel, la bougie
—	10	—	Girond	Giroud



TABLE DES MATIÈRES DU TOME PREMIER

CHAPITRE II

THÉORIE GÉNÉRALE DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES

Pages

CHAPITRE III

ÉLECTROMAGNÉTISME

CHAPITRE IV

GÉNÉRATEURS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE V

DYNAMO A COURANTS CONTINU (SUITE)

CHAPITRE VI

DYNAMOS A CORANT CONTINU

CHAPITRE VII

ALTERNATEURS

CHAPITRE VIII

ALTERNATEURS SIMPLES ET POLYPHASÉS (SUITE)

CHAPITRE IX

TRANSFORMATEURS

CHAPITRE X

ACCUMULATEURS

CHAPITRE XI

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

CHAPITRE XII

FILS ET CABLES

CHAPITRE XIII

CANALISATION AÉRIENNE

CHAPITRE XIV

INSTALLATION DE LA LIGNE

CHAPITRE XV

PHOTOMÉTRIE

Saint-Amand (Cher). — Imprimerie DESTENAY, Bussière Frères, successeurs.

EN VENTE A LA MÊME LIBRAIRIE

BIBLIOTHÈQUE ÉLECTROTECHNIQUE

Ier volume : **Manuel d'Electricité industrielle**, par C. TAINTURIER, Ingénieur des Arts et Manufactures. 1 volume de 300 pages, 215 fig. dans le texte. Prix : broché, 6 fr. Cartonné . . . . . 6 fr. 50.

IIe volume : **L'Electro-Aimant et l'Electro-Mécanique**, par SILVANUS P. THOMSON, traduit de l'Anglais par E. BOISTEL, Ingénieur-électricien, 1 volume, 575 pages, 221 figures dans le texte. Prix : broché, 10 fr. Cartonné. . . . . 10 fr. 75.

IIIe volume : **Les applications mécaniques de l'Energie électrique.** Utilisation mécanique de l'énergie électrique des réseaux de distribution pendant la journée. Renseignements pratiques sur l'installation et l'exploitation, par J. LAFFARGUE, ancien directeur de l'Usine municipale d'Electricité des Halles Centrales de la ville de Paris, licencié ès-sciences physiques, Ingénieur-électricien, 1 volume de 365 p. et 320 fig. dans le texte. Prix, br. 6 fr.; cart. 6 fr. 50

IVe volume : **Les applications mécaniques de l'Energie électrique**, par J. LAFFARGUE. 2e partie. — **Installations particulières.** Utilisation mécanique de l'énergie électrique par installations séparées. Applications diverses dans les usines, dans les mines, dans la marine, à la campagne. Renseignements pratiques sur l'installation et l'exploitation (*Paraîtra fin mars* 1896).

Ve volume : **Les Transformateurs d'énergie électrique**, par P. DUPUY, Ingénieur-électricien, 1 volume, 450 pages et 150 figures dans le texte. Broché, 7 fr. Cartonné. . . . . 7 fr. 50.

VIe et VIIe volumes : **La Dynamo**, par HAWKINS et WALLIS, 2 volumes in-8o écu, 400 pages chacun et nombreuses gravures dans le texte. Traduit de l'Anglais par E. BOISTEL. Br., 15 fr. Cartonnés, 16 fr. 50.

VIIIe, IXe et Xe volumes : **L'Eclairage électrique. — Traité pratique de montage et de conduite des installations d'éclairage électrique**, par FRANÇOIS MIRON, Ingénieur-électricien.

XIe volume : **Les Moteurs électriques**, par G. DUEZ, Ingénieur-électricien, licencié ès-sciences. 1 volume d'environ 350 pages et nombreuses gravures dans le texte (*Sous presse*).

XIIe volume : **La Traction électrique**, par G. ROUX, Ingénieur-électricien. 1 volume d'environ 300 pages et nombreuses gravures dans le texte (*En préparation*).

OUVRAGES DIVERS

Memento de l'Électricien, par C. TAINTURIER, Ingénieur des Arts et Manufactures. 1 volume in-32, format de poche. Cart. 1 fr. 5.

L'Ouvrier Electricien (Guide manuel pratique de), par H. de GRAFFIGNY. 1 vol. 325 pag. et 144 grav. dans le texte. Prix, broché. 4 fr »» Cartonné . . . . 4 fr. 50

Le Caoutchouc et la Gutta-Percha. Histoire naturelle, production, propriétés chimiques, physiques, mécaniques, applications. 1 fort volume in-8o raisin, d'environ 500 pages, nombreuses gravures dans le texte et une carte, par TH. SEELIGMANN, Chimiste industriel, LAMY-TORRILHON, fabricant de caoutchouc, H. FALCONNET, Ingénieur, et LAMY, Ingénieur, fabricant de caoutchouc. Prix, br . 15 fr. »»

Les alliages métalliques, par A. LEDEBUR, Professeur de métallurgie à l'École des mines de Freiberg. Traduit de l'allemand par TH. SEELIGMANN, Chimiste industriel, 1 vol. de 216 p. Prix, broché 4 fr. Cartonné . . . . 4 fr. 50

Le Fer et l'Acier, par A. LEDEBUR. Traduit de l'allemand par TH. SEELIGMANN, 1 volume 220 pages. Prix, br. 3 fr. 50, cart. 4 fr. »»

SAINT-AMAND (CHER). — IMP. DESTENAY, BUSSIÈRE FRÈRES

